

ไบโพลาร์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งและแนวนอน

VERTICAL AND LATERAL MAGNETIC FIELD DETECTION  
BIPOLAR MAGNETOTRANSISTOR

ชนา ลิขิตกรพงษ์พันธ์

CHANA LEEPATTARAPONGPAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2469-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ไบโพลาร์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งและแนวนอน

VERTICAL AND LATERAL MAGNETIC FIELD DETECTION  
BIPOLAR MAGNETOTRANSISTOR



ชนะ ลีภักทรพงศ์พันธ์

CHANA LEEPATTARAPONGPAN

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... **61611**  
วัน,เดือน,ปี..... **19 ก.ค. 2549**

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2469-2

**VERTICAL AND LATERAL MAGNETIC FIELD DETECTION  
BIPOLAR MAGNETOTRANSISTOR**

**CHANA LEEPATTARAPONGPAN**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2006**

**ISBN 974-15-2469-2**

**COPYRIGHT 2006**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ไบโพลาร์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก แนวตั้งและแนวนอน
นักศึกษา	นายชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์
รหัสนักศึกษา	47061206
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอน ทำการศึกษาออกแบบโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งและแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งและแนวนอน การทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนของพาหะและกระแสการฉีดจากการมอดคูเลททำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C$ ) และมีคุณสมบัติการทำงานพิเศษสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) ได้ โดยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองมีความสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $W$ ), ระยะห่างระหว่างอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์ ( $L$ ), กระแสอิมิตเตอร์ ( $I_E$ ) และแรงดันไบอัสเบส ( $V_A$ ) จากการศึกษาวิจัยพบว่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กมีค่าสูงที่ไบอัสเบส ( $V_A$ ) 10V, กระแสอิมิตเตอร์ ( $I_E$ ) 300 $\mu$ A จำนวนค่าความไวสัมบูรณ์ได้ 0.93 V/T และมีความเป็นเชิงเส้นดี การทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัว (recombination) ในเบสเป็นกระแสเบสและพาหะเบี่ยงเบนสะสมคอลเลคเตอร์เป็นกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) ซึ่งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในทิศทางแนวตั้งและแนวนอน การทดลองไบอัสที่กระแสอิมิตเตอร์ 10 mA พบว่าความไวสัมบูรณ์จากการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอนมีค่าสูงจำนวนได้ 9.5 V/T และความไวสัมบูรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งได้ 0.4 V/T โดยความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามารถเพิ่มขึ้นได้เป็นสองเท่าในโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา โครงสร้างสองตัวรวมกระแส แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถใช้งานได้ง่ายเหมือนกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ปกติ, ลดความยุ่งยากในการไบอัสและพัฒนาเพื่อใช้ในวงจรรวมต่อไป

<b>Thesis Title</b>	Vertical and Lateral Magnetic Field Detection Bipolar Magnetotransistor
<b>Student</b>	Mr. Chana Leepattarapongpan
<b>Student ID</b>	47061206
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Microelectronics Engineering
<b>Year</b>	2006
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Toempong Phetchakul

### **ABSTRACT**

This thesis presents bipolar magnetotransistor sensing vertical and lateral magnetic field, based on Hall Effect theory, which causes Lorentz force to affect on carrier to produce the electric current difference. Five terminals and three terminals magnetotransistor structures were designed and studied. Five terminals structure consisted of emitter, a pair of bases and a pair of collectors. It detected magnetic field by collector current difference ( $\Delta I_C$ ), also base-collector current difference ( $\Delta I_{CB}$ ) can be applicable. The results obtained suggest shown that  $\Delta I_C$  related to the gap between both collectors ( $w$ ) and the gap between emitter and collector ( $L$ ). The increment of emitter current ( $I_E$ ) and external electric field ( $V_A$ ) related to the higher output ( $\Delta I_C$ ) and sensitivity whereas linearity decreased. On the other hand, the three terminals structure procedure depended on Lorentz force action on carrier, made the difference between base and collector current ( $\Delta I_{CB}$ ). It has qualification to detect both vertical and lateral magnetic field. The result of vertical magnetic field response explained that the incremental emitter current made the difference between base and collector current increased. However, the linearity was not being affected. In conclusion, the sensitivity of three terminals is up to emitter current and magnetic field density. Besides, the experiment of lateral magnetic field response has higher sensitivity than vertical magnetic field response. Not only easy to use as same as simple bipolar magnetotransistor but also reduces the bias complex and can be developed for integrated circuit in future.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เต็ม-พงษ์ เพ็ชรกุล ในการวางแผนแนวทางการดำเนินงานวิจัยและช่วยแก้ปัญหาต่างๆตลอดจนการให้ความรู้ในทุกๆด้านจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช และ รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง กรรมการสอบหัวข้อและเค้าโครงวิทยานิพนธ์ ในการชี้แนะจุดบกพร่องและให้คำแนะนำจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้คำแนะนำปรึกษาในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

ขอขอบคุณ เพื่อนๆปริญญาโท วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้คำปรึกษาและกำลังใจตลอดสองปีการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่องจนสามารถทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงด้วยดี

ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
ศัพท์เทคนิค.....	XIII
สัญลักษณ์.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....	6
2.1 อุปกรณ์ฮอลล์.....	8
2.1.1 หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์.....	8
2.1.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์.....	14
2.2 แมกนีโตริซิสเตอร์.....	17
2.3 แมกนีโตไดโอด.....	19
2.4 แมกนีโตทรานซิสเตอร์.....	20
2.4.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง.....	20
2.4.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน.....	22
2.4.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา.....	24
2.5 คุณสมบัติต่างๆ ไปของอุปกรณ์เซ็นเซอร์.....	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 โครงสร้างและการออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์.....	29
3.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา.....	29
3.1.1 การเบี่ยงเบนของพาหะ.....	31
3.1.2 กระแสการฉีกจากการมอดคูเลท.....	34
3.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา.....	39
3.2.1 โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา.....	39
3.2.1 โครงสร้างสองตัวรวมกระแส.....	40
บทที่ 4 เทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้าง.....	45
4.1 กระบวนการออกซิเดชัน.....	45
4.1.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง.....	46
4.1.2 การออกซิเดชันแบบชื้น.....	46
4.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	46
4.2.1 การเตรียมผิวหน้าแผ่น.....	48
4.2.2 การเคลือบน้ำยาไวแสง.....	48
4.2.2.1 แบบสปินเนอร์.....	48
4.2.2.2 แบบสเปรย์.....	49
4.2.2.3 แบบใช้ลูกกลิ้ง.....	49
4.2.3 การอบชั้น prebake หรือsoftbake.....	49
4.2.4 การปรับชั้นมาสก์.....	50
4.2.5 การฉายแสง.....	52
4.2.6 การล้างน้ำยาไวแสง.....	53
4.2.7 การเอตซิงค์.....	53
4.3 กระบวนการแพร่สารเจือ.....	55
4.3.1 การแพร่สารเจือชนิดพี.....	55
4.3.2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น.....	56
4.4 กระบวนการเมตลไลเซชัน.....	57

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา.....	59
4.6 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา.....	69
<b>บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....</b>	<b>76</b>
5.1 การวัดคุณสมบัติแมกนีโตทรานซิสเตอร์.....	76
5.1.1 การวัดรอยต่อพี-เอ็น.....	76
5.1.2 การวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า.....	77
5.2 การวัดผลตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา.....	79
5.2.1 วงจรการวัดทดลอง.....	79
5.2.2 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง.....	80
5.2.3 กลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา.....	82
5.2.4 ผลของแรงดันไฟฟ้า $V_A$ ที่มีต่อเอาต์พุตของอุปกรณ์.....	84
5.2.5 ผลกระแสการทำงาน $I_E$ ที่มีต่อเอาต์พุตของอุปกรณ์.....	85
5.2.6 ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก (sensitivity).....	87
5.3 การวัดผลตอบสนองสนามแม่เหล็กโหมคการทำงานสามขา.....	88
5.3.1 วงจรการวัดทดลอง.....	88
5.3.2 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง.....	89
5.3.3 ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก (sensitivity).....	92
5.4 การวัดผลตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา.....	92
5.4.1 วงจรการวัดทดลอง.....	93
5.4.2 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง.....	93
5.4.3 ผลของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์ $I_E$ .....	96
5.4.4 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งของรูปแบบ โครงสร้างสองตัวรวม กระแส.....	97
5.4.5 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวนอน.....	101
5.4.6 ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ( sensitivity ).....	104

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	107
เอกสารอ้างอิง.....	109
ภาคผนวก.....	111
ภาคผนวก ก. คุณสมบัติทั่วไปของซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์.....	112
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	115
ประวัติผู้เขียน.....	138

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การค้นพบปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กในยุคต่างๆ.....	7
2.2 รายละเอียดคุณลักษณะของเซนเซอร์ในทางอุดมคติ.....	28
4.1 แสดงค่าของระดับความสะอาดของห้องสะอาด.....	49
5.1 การเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ $I_E = 100 \mu\text{A}$ .....	87
5.2 การเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ $V_A = 10 \text{ V}$ .....	88
5.3 การเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ที่ $I_E$ ค่าต่างๆในโหมดการทำงานสามขา.....	92
5.4 การเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา.....	104
5.5 การเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งโครงสร้างสองตัวรวมกระแส.....	105
5.6 การเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา.....	106

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในตำแหน่งต่างๆ.....	6
2.2 การจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....	8
2.3 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	9
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการ ได้ปในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค.....	11
2.5 ด้านตัดขวางโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์.....	14
2.6 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง.....	15
2.7 โครงสร้างด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง.....	16
2.8 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน(ก) ด้านบน.....	16
2.8 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน(ข) ด้านตัดขวาง.....	17
2.9 เอาท์พุทของเข็มทิศแม่เหล็ก.....	17
2.10 โครงสร้างของแมกนีโตริซิสเตอร์.....	18
2.11 โครงสร้างด้านตัดขวางของแมกนีโตไดโอด.....	19
2.12 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสองชนิด.....	20
2.13 ด้านตัดขวางโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง.....	21
2.14 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน.....	22
2.15 ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ ( โฮล ).....	23
2.16 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา.....	24
2.17 พื้นที่การเบี่ยงเบนของพาหะ ( โฮล ) ทำมุมเบี่ยงเบน $\theta_H$ .....	24
2.18 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ในทางอุดมคติ.....	26
2.19 ฮิสเตอร์รีซิสต์ยานเอาท์พุทที่แตกต่างไปจากค่าเดิม.....	27
3.1 ด้านตัดขวางโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา.....	29
3.2 ภาพด้านแสดงมิติโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา.....	30
3.3 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะในมุมเบี่ยงเบน $\theta$ .....	31
3.4 (ก) เส้นสัณย์เท่ากันของอุปกรณ์ฮอลล์ และ (ข) แรงดันฮอลล์ในบริเวณต่างๆ.....	33
3.5 การเกิดแรงดันฮอลล์ที่ระยะความยาว L ของอุปกรณ์ฮอลล์.....	33
3.6 การลดลงของความยาว L ที่มีผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า.....	34
3.7 กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากผลของกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท.....	34
3.8 โปรแกรม COREL DRAW สำหรับการออกแบบลวดลายต้นแบบ.....	36

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ทำการออกแบบที่ค่า W และค่า L ต่างๆ.....	37
3.10 ลวดลายคั่นแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา.....	38
3.11 รูปโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา .....	39
3.12 ทิศทางกระแสไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา.....	39
3.13 ค้านัดคขวางโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาแบบสองตัวรวมกระแส .....	41
3.14 ลวดลายคั่นแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา(ก) Base Mask.....	42
3.14 ลวดลายคั่นแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา(ข) Emitter, Collector Mask.....	43
3.14 ลวดลายคั่นแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา(ค) Contact Window Mask.....	43
3.14 ลวดลายคั่นแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา(ง) Aluminum Mask.....	44
4.1 ขั้นตอนกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	47
4.2 กระบวนการพิมพ์ภาพ โดยวิธี Projection Printing.....	51
4.3 กระบวนการพิมพ์ภาพ โดยวิธี Step and Repeat Projection.....	52
4.4 แสงสเปคตรัมของหลอดเมอร์คิวรี.....	53
4.5 ผลของการเอตซิงค์ .....	54
4.6 อุณหภูมิที่เกิด Al Spike.....	57
4.7 กระบวนการระเหยในสุญญากาศ ( evaporation ).....	58
4.8 แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น.....	59
4.9 ซิลิคอนไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิคอน.....	59
4.10 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสค์ที่ 1.....	60
4.11 ผลการ develop ภายหลังจากฉายแสง.....	61
4.12 ผลการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์.....	61
4.13 กระบวนการลอกน้ำยาไวแสง.....	62
4.14 กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส.....	63
4.15 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี .....	63
4.16 (ก) การสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และ (ข) ภายหลังจากลอกฟิล์ม.....	64
4.17 กระบวนการแพร่สารเจือ โบรอน ได้ส่วนอิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์.....	65
4.18 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสค์ที่ 3.....	65
4.19 กระบวนการลอกน้ำยาไวแสง.....	66
4.20 การสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อสร้างช่อง contact .....	66

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 กระบวนการเคลื่อนชั้นอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการระเหยในสุญญากาศ.....	66
4.22 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 4 .....	67
4.23 แมกนีโดทรานซิสเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์.....	68
4.24 ภาพถ่ายแมกนีโดทรานซิสเตอร์ห้าขาที่เสร็จสมบูรณ์.....	68
4.25 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างของแมกนีโดทรานซิสเตอร์สามขา (ก)-(ค).....	69
4.25 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างของแมกนีโดทรานซิสเตอร์สามขา (ง)-(ฉ).....	70
4.25 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างของแมกนีโดทรานซิสเตอร์สามขา (ช)-(ฉ).....	71
4.25 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างของแมกนีโดทรานซิสเตอร์สามขา (ญ)-(ฎ).....	72
4.25 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างของแมกนีโดทรานซิสเตอร์สามขา (ฐ)-(ฒ).....	73
4.25 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างของแมกนีโดทรานซิสเตอร์สามขา (ณ)-(ด).....	74
4.26 ภาพถ่ายแมกนีโดทรานซิสเตอร์สามขา .....	75
5.1 คุณสมบัติรอยต่อพี-เอ็นที่ขั้วใช้งานต่างๆของแมกนีโดทรานซิสเตอร์ห้าขา.....	76
5.2 คุณสมบัติรอยต่อพี-เอ็นของแมกนีโดทรานซิสเตอร์สามขา .....	77
5.3 คุณสมบัติความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของแมกนีโดทรานซิสเตอร์ห้าขา.....	77
5.4 คุณสมบัติความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของแมกนีโดทรานซิสเตอร์สามขา.....	78
5.5 วงจรไบอัสแมกนีโดทรานซิสเตอร์ห้าขา.....	79
5.6 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งที่ค่ากระแสทำงานต่างๆ .....	80
5.7 ทิศทางการเคลื่อนที่ของโฮลขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน.....	81
5.8 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ(โฮล).....	82
5.9 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน.....	83
5.10 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ(อิเล็กตรอน).....	83
5.11 พาหะ(โฮล)เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในมุมที่กว้างขึ้นตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก.....	84
5.12 ผลของการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้า $V_A$ .....	84
5.13 ระยะการเบี่ยงเบน $L$ ที่มีผลต่อเอาท์พุท $\Delta I_C$ .....	85
5.14 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กที่ค่ากระแสทำงานต่างๆ .....	86
5.15 ปริมาณพาหะ(โฮล)ที่เพิ่มขึ้นตามกระแสการทำงานอิมิตเตอร์.....	87
5.16 วงจรไบอัสการทำงานสามขาของแมกนีโดทรานซิสเตอร์ห้าขา.....	89
5.17 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งที่ค่ากระแสการทำงานต่างๆ.....	89

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 ทิศทางการเคลื่อนที่ของโฮลในโหมคการทำงานสามขา.....	90
5.19 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ(โฮล)ในภาวะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน.....	91
5.20 พาหะ(โฮล)เคลื่อนที่ในมุมเบี่ยงเบนที่กว้างขึ้นตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก.....	91
5.21 วงจรการวัดทดลองแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา.....	93
5.22 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่กระแสการทำงานต่างๆ.....	94
5.23 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะ(โฮล)ในภาวะปกติ.....	95
5.24 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ(โฮล).....	95
5.25 พาหะ(โฮล)เคลื่อนที่ในมุมที่กว้างขึ้นตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก.....	96
5.26 การเพิ่มปริมาณการฉีดพาหะ(โฮล)เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสอิมิตเตอร์.....	97
5.27 วงจรวัดการทดลองแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา โครงสร้างสองตัวรวมกระแส.....	97
5.28 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง โครงสร้างสองตัวรวมกระแสที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ต่างๆ.....	98
5.29 ทิศทางการเคลื่อนที่ของโฮลภาวะปกติรูปแบบ โครงสร้างสองตัวรวมกระแส.....	99
5.30 ทิศทางการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของโฮลในการวัดสองตัวรวมกระแส โครงสร้าง.....	100
5.31 การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของโฮล.....	100
5.32 ทิศทางของสนามแม่เหล็กแนวอน ( $B_y$ ) ที่ตัดผ่านแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา.....	101
5.33 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่กระแสการทำงาน อิมิตเตอร์ค่าต่างๆ.....	102
5.34 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ(โฮล)เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทาง $-Z$ .....	103
5.35 การเปลี่ยนแปลงมุมเบี่ยงเบนของโฮลตามทิศทาง $-Z$ .....	104

## ศัพท์เทคนิค

การเบี่ยงเบนของพาหะ	Carrier Deflection
พาหะ	Carrier
อุปกรณ์เดี่ยว	Discrete
การออกซิเดชันแบบแห้ง	Dry Oxidation
กระบวนการเอตซิงค์	Etching
กระบวนการระเหยในสุญญากาศ	Evaporation
อิเล็กตรอน	Electron
อุปกรณ์ฮอลล์	Hall Plate
ปรากฏการณ์ฮอลล์	Hall Effect
อะตอมสามรเจือ	Impurity Atom
แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ตามแนวนอน	Lateral Magnetotransistor
แมกนีโตทรานซิสเตอร์	Magnetotransistor
แมกนีโตไดโอด	Magnetodiode
ประจุพาหะส่วนมาก	Majority Carrier
ประจุพาหะ	Carrier
การปรับซ็อนมาสก์	Mask Alignment
ประจุพาหะที่รวมตัวกัน	Recombination
กระแสการฉีดจากการมอดคูเลท	Modulation Current
	Injection
แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา	Three Terminal
	Magnetotransistor
การออกซิเดชันด้วยความร้อน	Thermal Oxidation
กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง	Resist development
กระบวนการเมทัลไลเซชัน	Metalization
โฮล	Hole
วงจรขยายความแตกต่าง	Differencetial Amplifier
แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ตามแนวตั้ง	Vertical Magnetotransistor

## สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$H$	ความเข้มสนามแม่เหล็ก	A/m
$B$	ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก	T
$\mu^B$	ค่าซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุ	$\text{H m}^{-1}$
$\mu_0^B$	ค่าซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุ ในอวกาศ	$\text{H m}^{-1}$
$\mu_r^B$	ค่าซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุ แบบสัมพัทธ์	-
$J_x$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	$\text{A/cm}^2$
$v_x$	ความเร็วครีฟท์ของพาหะ	$\text{m s}^{-1}$
$F_L$	แรงลอเรนซ์	-
$\varepsilon$	สนามไฟฟ้า	-
$\rho$	สภาพต้านทานไฟฟ้า	$\Omega\text{-cm}$
$e$	ค่าประจุอิเล็กตรอน	C
$V_H$	แรงคันทอลล์	V
$R_H$	สัมประสิทธิ์ฮอลล์	$\text{m}^3 \text{C}^{-1}$
$\mu_p$	สภาพความคล่องตัวของโฮล	$\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$
$\mu_n$	สภาพความคล่องตัวของอิเล็กตรอน	$\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$
$\theta_H$	มุมฮอลล์	°
$\mu_H$	สภาพความคล่องตัวฮอลล์	$\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$
$G$	พารามิเตอร์โครงสร้าง	-
$K_g$	ค่าคงที่ที่ขึ้นกับโครงสร้าง	-
$\Delta I_C$	ความแตกต่างระหว่างกระแส คอลเลกเตอร์ทั้งสอง	A
$\Delta I_{CB}$	ความแตกต่างระหว่างกระแส เบสกับกระแสคอลเลกเตอร์	A
$S_R$	ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก แบบสัมพัทธ์	$\text{T}^{-1}$

## สัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$W_E$	ความยาวอิมิตเตอร์	m
$I_E$	กระแสอิมิตเตอร์	A
$\Delta V$	ความแตกต่างของกระแสไฟฟ้า ในรูปแบบแรงดันไฟฟ้า	V
$E$	อิมิตเตอร์	-
$B$	เบส	-
$C$	คอลเลกเตอร์	-
$I_B$	กระแสเบส	A
$I_C$	กระแสคอลเลกเตอร์	A
$d$	ความลึกของรอยต่อ	m
$I_S$	กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ	A
$V_{BE}$	แรงดันตกคร่อมรอยต่ออิมิตเตอร์-เบส	V
$\Delta I_E$	การเปลี่ยนแปลงของกระแสอิมิตเตอร์	A
$\Delta V_{BE}$	การเปลี่ยนแปลงของแรงดันตกคร่อม รอยต่ออิมิตเตอร์-เบส	V
$T$	อุณหภูมิ	K
$\mu_{HL}$	สภาพความคล่องตัวกรณีพิจารณา การชนกันของพาหะกับแลตทิซ	$m^2 V^{-1} s^{-1}$
$R_{HL}$	สัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีพิจารณา การชนกันของพาหะกับแลตทิซ	$m^3 C^{-1}$
$R_{HI}$	สัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีพิจารณา การชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ	$m^3 C^{-1}$
$\mu_{HI}$	สภาพความคล่องตัวกรณีพิจารณา การชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ	$m^2 V^{-1} s^{-1}$

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีการวิจัยพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆอย่างต่อเนื่อง เช่น อุปกรณ์ตรวจจับแสง อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ฯลฯ การพัฒนาโครงสร้างและการทำงานเพื่อนำมาเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจึงเป็นอีกบทบาทของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก เช่น ไดโอด, ทรานซิสเตอร์, มอสเฟต ฯลฯ โดยอุปกรณ์เหล่านี้อาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างประจุพาหะและความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีบทบาทและถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากมีโครงสร้างขนาดเล็ก, สัญญาณรบกวนที่เอาท์พุทมีค่าต่ำ, สามารถใช้งานกับวงจรรวมได้และสามารถประยุกต์ใช้งานต่างๆได้หลากหลาย [1]

ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่นำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กเรียกอีกแบบว่า แมกนีโตทรานซิสเตอร์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (vertical magnetotransistor) และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน (lateral magnetotransistor) โดยปกติแล้วโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ประกอบด้วย คอลเลคเตอร์สองขา, อิมิตเตอร์หนึ่งขาและขั้วเบสสองขา ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ ทำให้พาหะเบี่ยงเบนเกิดความไม่สมดุลของกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสการทำงานอิมิตเตอร์ กลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์จะขึ้นอยู่กับ การเบี่ยงเบนของพาหะและอัตราการฉีดพาหะของอิมิตเตอร์ [1-7]

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ตามแนวนอน ศึกษาโครงสร้างปกติของแมกนีโตทรานซิสเตอร์มีขาใช้งานห้าขาพัฒนามาใช้ในโหมดการทำงานสามขาและทำการพัฒนาออกแบบเป็นสามขาแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C$ ) กลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองขึ้นอยู่กับ การเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) [8-11] แต่โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาตรวจจับสนามแม่เหล็กได้เพียงทิศแนวตั้งและมีการไบอัสที่ยุ่งยาก ศึกษาการใช้งานสามขาตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัว (recombination) ในเบสเป็นกระแส

เบสและพาหะที่เบี่ยงเบนเป็นกระแสคอลเลคเตอร์เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) ทำการออกแบบเปลี่ยนแปลงแมกนีโตทรานซิสเตอร์ให้มีขาใช้งานสามขา ประกอบด้วย อิมิตเตอร์, เบสและคอลเลคเตอร์ ตรวจสอบสนามแม่เหล็กโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ สามารถตรวจสอบสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวนอน มีความเหมาะสมที่จะทำเป็นอุปกรณ์เดี่ยว (discrete) ได้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1. ศึกษาหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างประจุพาหะและความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก
2. ศึกษาและทำความเข้าใจขั้นตอนกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์
3. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาในการตรวจสอบสนามแม่เหล็กแนวตั้ง
4. ศึกษาโครงสร้างและการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาในการตรวจสอบสนามแม่เหล็กแนวตั้งและแนวนอน
5. วิเคราะห์คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์
6. ศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์, ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและความแตกต่างของกระแสไฟฟ้า
7. ศึกษาค่าความไวในการตรวจสอบสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาและสามขา
8. ศึกษาค่าความไวในการตรวจสอบสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

## 1.3 สมมติฐานการศึกษา

1. แมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างปกติห้าขา สามารถตรวจสอบสนามแม่เหล็กแนวตั้งได้โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C$ ) กลไกในการเกิดความแตกต่างขึ้นอยู่กับการเบี่ยงเบนของพาหะ(carrier deflection)และกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท(modulation current injection)
2. แมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาสามารถพัฒนาเพื่อใช้งานสามขาได้ ตรวจสอบสนามแม่เหล็กแนวตั้งโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ )
3. แมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างสามขา สามารถตรวจสอบสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวนอน โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัว (recombination) ใน

เบสเป็นกระแสเบสและพาหะที่เบี่ยงเบนเป็นกระแสคอลเลกเตอร์( $\Delta I_{CB}$ ) กลไกในการเกิดความแตกต่างขึ้นอยู่กับ การเบี่ยงเบนของพาหะ(carrier deflection)

4. ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นสนามแม่สนามแม่เหล็กและกระแสการทำงานอิมิตเตอร์

5. การลดจำนวนการใช้งานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์จากห้าเป็นสามจะสามารถ พัฒนาเพื่อทำเป็นอุปกรณ์เดี่ยว (discrete) ได้

#### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีบทบาทมากที่สุดและถูกนำมาใช้งานต่างๆ ได้หลากหลาย การใช้ประโยชน์จากโครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เพื่อประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจึงเป็นอีกหนึ่งบทบาทของทรานซิสเตอร์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาแมกนีโตทรานซิสเตอร์ โครงสร้างปกติห้าขาตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งโดยอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสอง แต่โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาตรวจจับสนามแม่เหล็กได้เพียงทิศทางเดียว อีกทั้งการพัฒนาโครงสร้างเพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวนอนเป็นไปได้ยาก จึงทำการศึกษาเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ให้เหลือเพียงสามขา โดยการทำงานอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัว(recombination)ในเบสเป็นกระแสเบสและพาหะที่เบี่ยงเบนเป็นกระแสคอลเลกเตอร์ซึ่งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กสนามแม่เหล็กทั้งในทิศทางแนวตั้งและแนวนอน โดยที่ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กไม่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา

#### 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยใช้โครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เรียกอีกแบบว่าแมกนีโตทรานซิสเตอร์ เริ่มศึกษาแมกนีโตทรานซิสเตอร์ โครงสร้างปกติห้าขาตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง ศึกษาแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาในการใช้งานสามขาและทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ให้เหลือเพียงสามขาเพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวนอน วิเคราะห์คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ เปรียบเทียบเอาท์พุทที่พารามิเตอร์ต่างๆ และศึกษาความสัมพันธ์ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กกับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสอิมิตเตอร์

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์
  2. ศึกษาโครงสร้างและการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์
  3. ศึกษากระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์
  4. ศึกษาการออกแบบมาส์คด้วยโปรแกรม corel draw
  5. ศึกษากระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์
  6. ศึกษากระบวนการโฟโตลิโธกราฟี
  7. ศึกษากระบวนการแพร่อะตอมสารเจือโบรอนและฟอสฟอรัส
  8. ศึกษาวิธีการระเหยในสุญญากาศ (evaporation)
  9. ศึกษาคุณสมบัติความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของไบโพลาร์แมกนีโตทรานซิสเตอร์
  10. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งที่เป็นผลต่อเอาท์พุท ( $\Delta I_c$ ) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างห้าขา
  11. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนที่มีผลต่อเอาท์พุท ( $\Delta I_{cb}$ ) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา
  12. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กกับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสการทำงานอิมิตเตอร์
- โดยเนื้อหาในวิทยานิพนธ์จะแบ่งเป็นบทต่างๆตามรายละเอียดดังนี้
- บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงประเด็นของปัญหา วัตถุประสงค์ สมมติฐาน ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อทำความเข้าใจภาพรวมทั้งหมดของวิทยานิพนธ์
- บทที่ 2 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก กล่าวถึง หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์ และชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก เช่น อุปกรณ์ฮอลล์, แมกนีโตริซิสเตอร์, แมกนีโตไดโอดและแมกนีโตทรานซิสเตอร์
- บทที่ 3 โครงสร้างและการออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ กล่าวถึง การออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาโดยทำการออกแบบเปรียบเทียบความยาวเบส L และความกว้างระหว่างคอลเลคเตอร์ทั้งสอง W ที่พารามิเตอร์ต่างๆ ทำการออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาโดยออกแบบเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาในรูปแบบสองตัวรวมกระแสและการออกแบบมาส์คของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาและสามขา

บทที่ 4 เทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้าง กล่าวถึง เทคโนโลยีในการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ เช่น กระบวนการออกซิเดชัน, กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ฯลฯ กระบวนการสร้างของอุปกรณ์ทั้งโครงสร้างห้าชั้นและสามชั้น

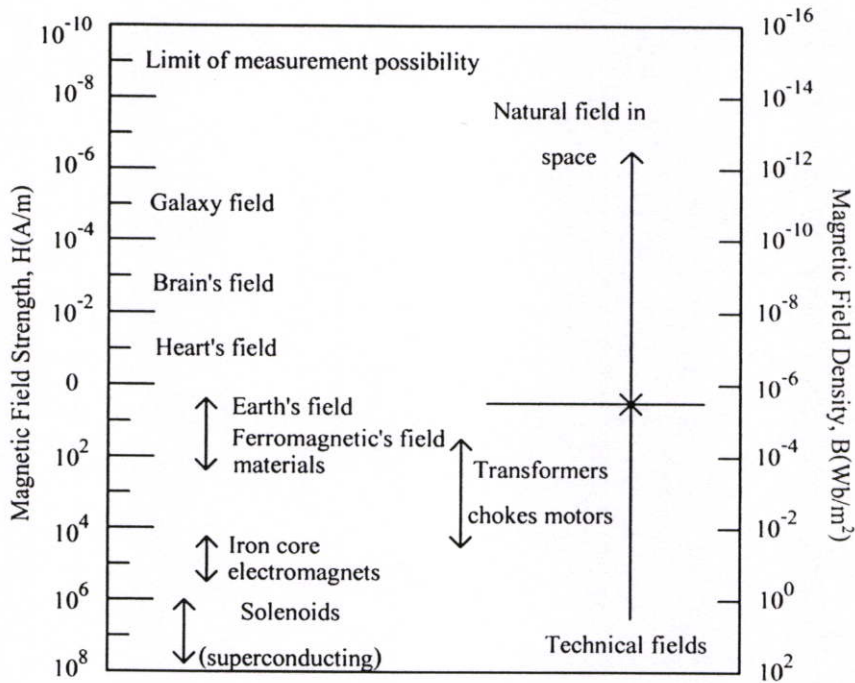
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง กล่าวถึง การทดลองต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทดลองคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งและแนวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาและสามขา แสดงตารางค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแต่ละรูปแบบ

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ เป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากบทที่ 5 โดยนำผลการทดลองทั้งหมดมาสรุปเพื่อให้ผลการทดลองที่ได้เกิดความชัดเจนขึ้นและรวมไปถึงข้อเสนอแนะเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย

## บทที่ 2

### อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

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



รูปที่ 2.1 ระดับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในตำแหน่งต่างๆ[15]

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

กับพื้นที่ 1 ตารางเมตร ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B ในวัสดุจะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยแสดงได้โดย

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

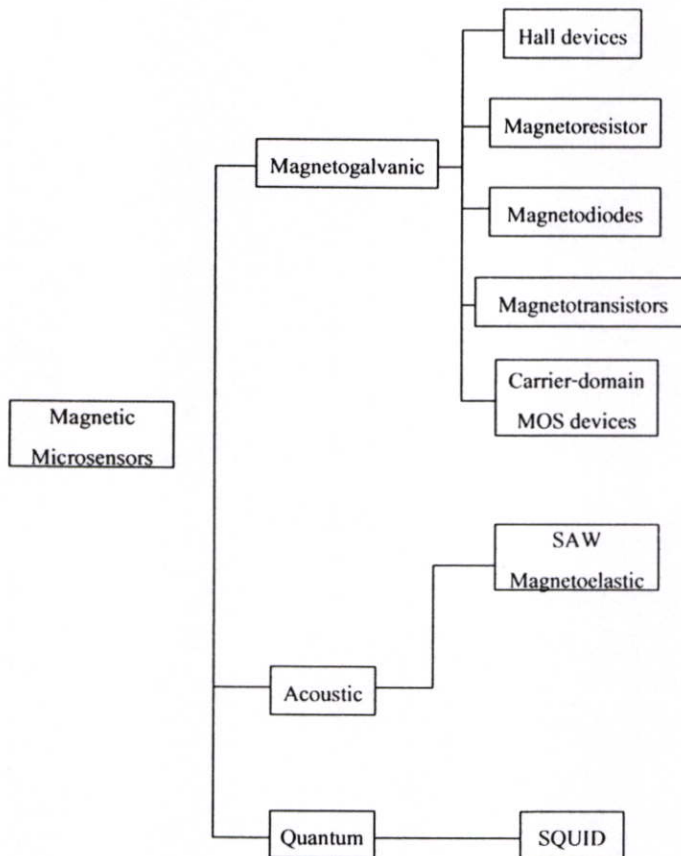
โดย  $\mu^B$  คือค่าซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุซึ่งค่าซึมซาบแม่เหล็กในอวกาศ  $\mu_0^B$  จะมีค่า  $4\pi \times 10^{-7}$  และค่าซึมซาบแบบสัมพัทธ์  $\mu_r^B$  จะมีค่าประมาณ  $\mu_r^B \gg 1$  ในวัสดุที่ค่าซึมซาบระดับสูงแต่อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจะใช้ค่าซึมซาบระดับต่ำคือประมาณ  $\mu_r^B \cong 1$

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

ตารางที่ 2.1 การค้นพบปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กในยุคต่างๆ[15]

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

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



รูปที่ 2.2 การจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก[15]

## 2.1 อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Plates)

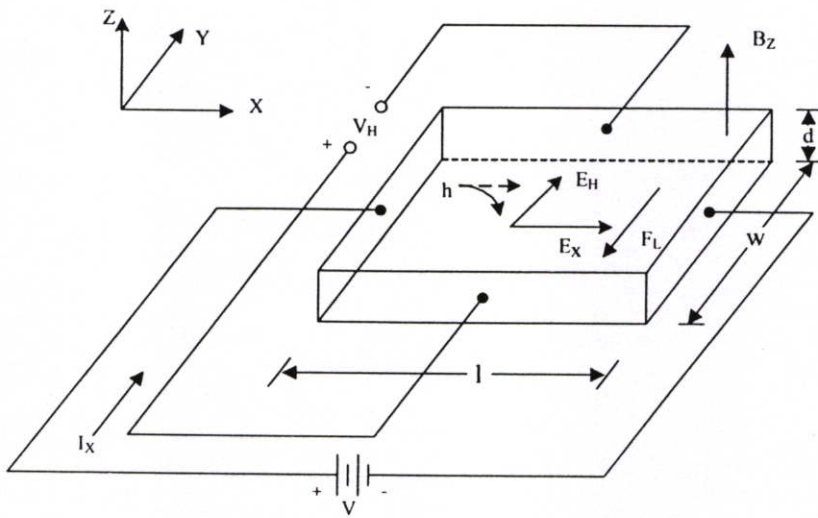
### 2.1.1 หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์

ในการศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์นั้นสามารถอธิบายการทำงานจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถพิจารณาจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำ และให้สนามแม่เหล็กทำมุมตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแส จะทำให้มี

แรงลอเรนซ์เกิดขึ้นในทิศที่ตั้งฉากกับทิศทางของกระแส และทิศทางของสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์

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

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



รูปที่ 2.3 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี [21]

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

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

โดยที่  $\overline{F}_L$  คือ แรงลอเรนซ์มีขนาดเป็น

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

และมีทิศทางในแกน  $-y$  ดังนั้นจะทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาแกน  $-y$  และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ ด้านตรงข้าม (ด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำ) จึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น เนื่องจากโฮลทางด้านหน้ามีจำนวนมากๆ ในขณะที่ด้านหลังมีจำนวนของโฮลน้อยกว่าทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน  $E_H$  ในทิศ  $+y$  สนามไฟฟ้านี้จะต้านทานการเคลื่อนที่ของโฮลซึ่งถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ในภาวะสมดุล ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ตรงไปในทิศ  $+y$  ได้แสดงว่าแรงลอเรนซ์ ( $F_L$ ) และแรงจากสนามไฟฟ้าภายใน ( $eE_H$ ) มีค่าเท่ากัน นั่นคือ

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

จาก 
$$E_H = v_x.B_z \quad (2.4)$$

$$J_x = p.e.v_x$$

หรือ 
$$v_x = \frac{J_x}{p.e}$$

แทนค่า  $v_x$  ลงในสมการ (2.4) จะได้

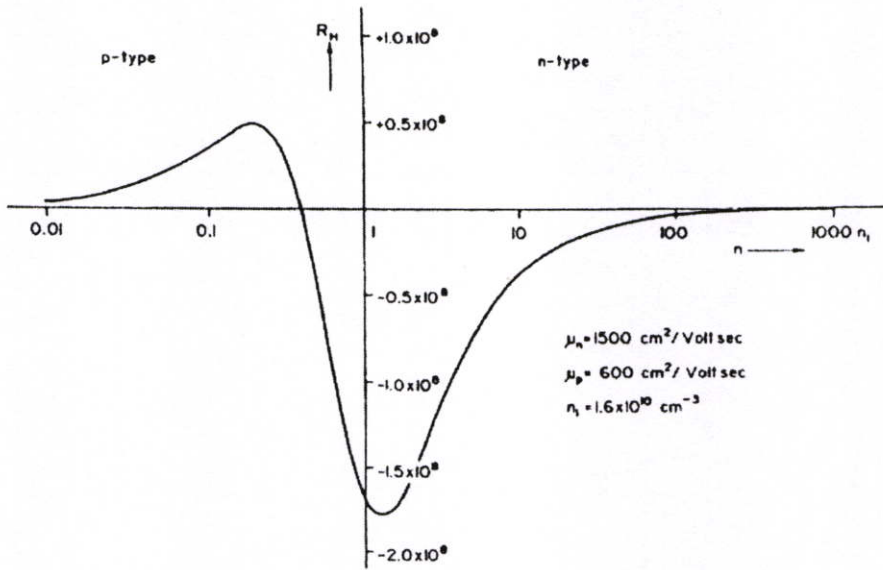
$$E_H = \frac{J_x.B_z}{p.e}$$

ดังนั้นจะได้

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

โดย  $R_H$  คือ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)

รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำชนิดคอนดักชันทรินซิกซึ่งเปลี่ยนแปลงสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าในการโด๊ประดับต่ำสามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่มีค่าสูงได้ แต่โดยส่วนมากแล้วจะไม่เลือกใช้ในการโด๊ประดับต่ำสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์ฮอลล์จะเป็นผลให้แรงดันฮอลล์ที่ได้มีค่าลดลง โดยค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเลือกใช้ได้จากการคำนวณซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก

จากรูป 2.3 เมื่อทำการวัดแรงดันระหว่างด้านหน้า และด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ  $w$  จะได้

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

โดย  $V_H$  คือ แรงดันฮอลล์ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ

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

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

หรือ

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

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

ความหนาแน่นของโฮล คือ

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

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

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

จาก

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

ดังนั้นจะได้

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

จากสมการ (2.9), (2.10) และ (2.11) จะเห็นว่า การทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญของแท่งสารกึ่งตัวนำได้ คือ ความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะ ได้เป็นอย่างดี

ในการทำงานเดียวกัน ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แรงดันฮอลล์ ( $V_H$ ) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือ มีค่าเป็นลบ และจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์  $R_H$  แสดงดังนี้

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

ดังนั้น โดยการวัดแรงดันฮอลล์ ทำให้เราสามารถบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นสารชนิดเอ็น หรือชนิดพีได้ ผลตอบสนองของความไว (sensitivity) คือ แรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแส และสนามแม่เหล็กจะเป็น

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

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

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

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

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

หรือ

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

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

จะได้

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

ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ถูกต้องนัก ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ  $R_{Hl}$  สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้โดย

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

และ

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

หรือ

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

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

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

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

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

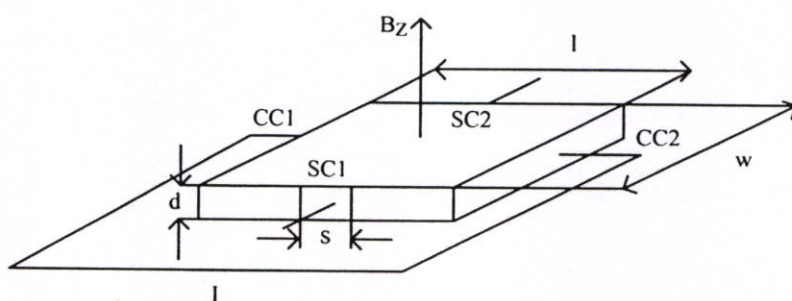
และ

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

โดย  $\mu_{Hh}$  คือสภาพความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ

### 2.1.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

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



รูปที่ 2.5 ด้านตัดขวางโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ [1]

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

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

เนื่องจากสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพิจารณาพฤติกรรมของพาหะอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งในกรณีอุปกรณ์ฮอลล์ที่อิเล็กตรอนมากกว่าโฮล ( $n \gg p$ ) สามารถแสดงสมการแรงดันฮอลล์ได้ดังนี้

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

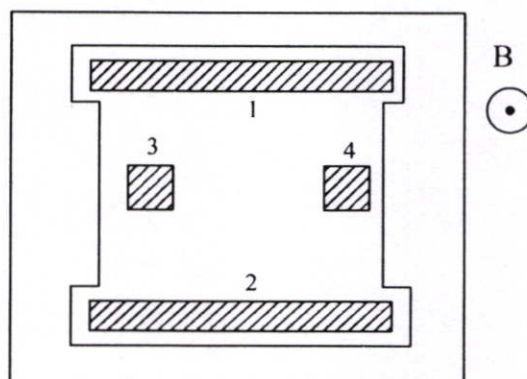
โดยที่  $r_n$  คือ พารามิเตอร์การกระเจิง (scattering parameter)

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

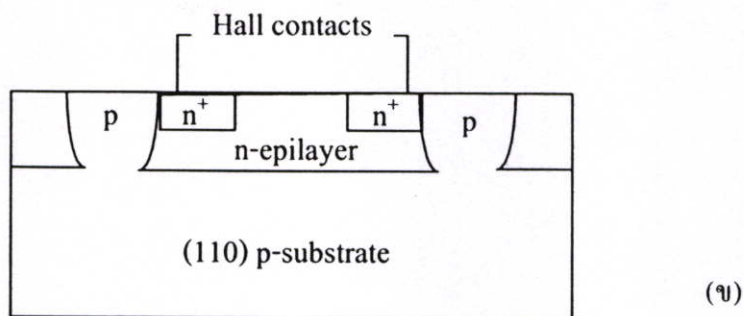
$$G = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2} \cdot \frac{l}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H}\right) \right] \cdot \left[ 1 - \frac{2}{\pi} \cdot \frac{s}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H} \right] \quad (2.20)$$

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

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



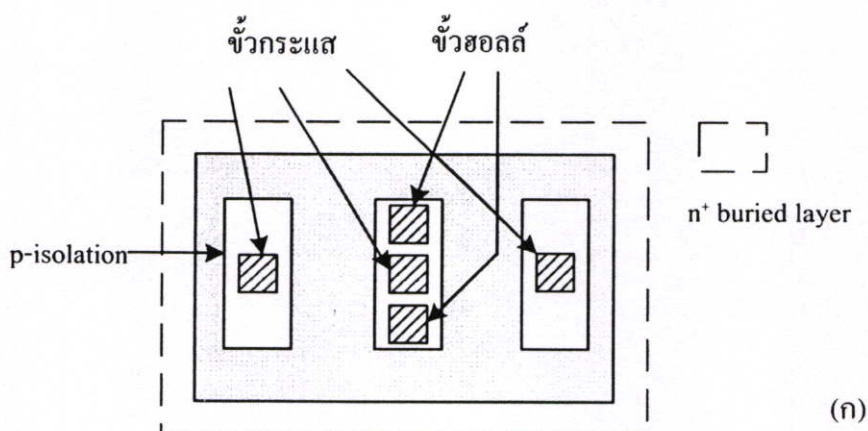
รูปที่ 2.6 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง[15]



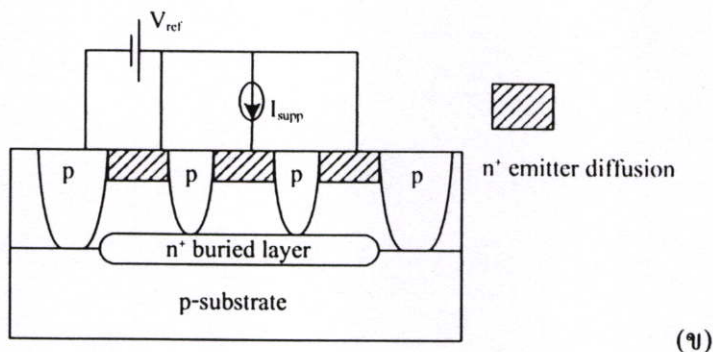
รูปที่ 2.7 โครงสร้างด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง [15]

อุปกรณ์ฮอลล์นี้ใช้วัดตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งแต่สามารถประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอนได้โดยเรียกว่าอุปกรณ์ฮอลล์แนวอน แสดงดังรูปที่ 2.8 โดยที่โครงสร้างนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นพื้นฐานที่จะสร้างเข็มทิศแม่เหล็ก โดยพื้นที่ของอิเล็คโทรคอกแบบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กประมาณ  $41 \text{ V/AT}$  โดยมีระดับสัญญาณรบกวน  $1 \times 10^{-5} \text{ T}/\sqrt{\text{Hz}}$  ที่  $40 \text{ Hz}$

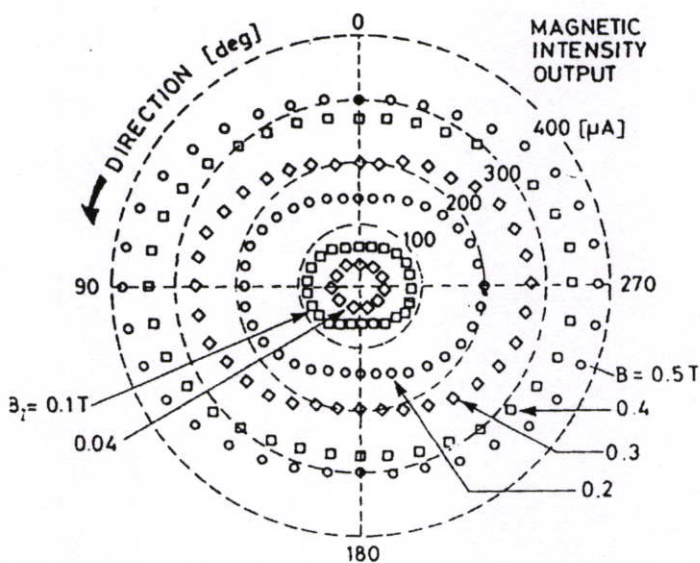
อุปกรณ์ฮอลล์ชนิดแนวตั้งและแนวอนสามารถสร้างได้โดยกระบวนการสร้าง CMOS เช่น อุปกรณ์ฮอลล์สามมิติแบบเข็มทิศแม่เหล็กสามารถสร้างได้ในระดับ  $2 \mu\text{m}$  แสดงดังรูปที่ 2.9 สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งสามทิศทาง ( $B_x, B_y, B_z$ ) โดยการวัดอาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะในมุมเบี่ยงเบนต่างๆซึ่งสามารถนำมาแสดงเป็นความหนาแน่นสนามแม่เหล็กได้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



(ก)



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



รูปที่ 2.9 เอ้าท์พุทของเข็มทิศแม่เหล็ก[15]

## 2.2 แมกนีโตริซิสเตอร์ (Magnetoresistor)

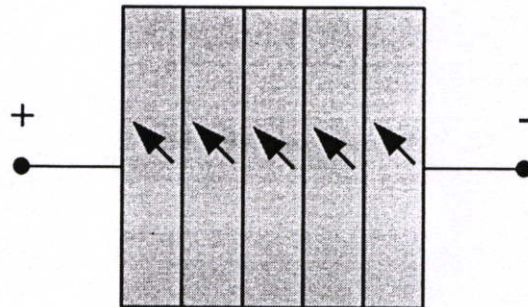
สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โครงสร้างของความต้านทานไฟฟ้าซึ่งเรียกว่า แมกนีโตริซิสเตอร์ อาศัยปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสเทนซ์ (magnetoresistance effect) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลมาจากแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะเกิดเป็นมุม  $\theta$  ทำให้พาหะเคลื่อนที่ในระยะทางที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความต้านทานมากขึ้น มุมการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนหาได้โดยสมการที่ (2.21) และค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดจากมุมเบี่ยงเบน  $\theta$  หาได้ดังสมการที่ (2.22)

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

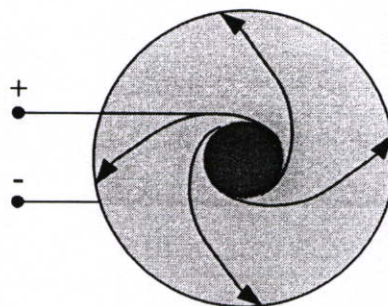
$$R(\theta) = R_0(1 + \tan^2 \theta) \rightarrow R(B_z) = R_0(1 + K_{ar} \cdot \mu^2 \cdot B_z^2) \quad (2.22)$$

โดยที่  $K_{ar}$  ขึ้นกับอัตราส่วนของขนาดเพลทซึ่งในอุดมคติเพลทมีความกว้างมากกว่าความยาว

โดยปกติแล้วแมกนีโตริซิสเตอร์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ฮอลล์เพลทแบบขนาน (parallel Hall plates) และแบบวงกลม (caibino disc) ดังแสดงรูปที่ 2.10 โดยที่รูป 2.10 (ก) แสดงโครงสร้างแมกนีโตริซิสเตอร์ฮอลล์เพลทแบบขนานซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยความต้านทานที่เรียงต่อกันเป็นแผ่นขนาน โดยการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กจะแตกต่างกับอุปกรณ์ฮอลล์คือในอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์จะไม่อาศัยการเกิดขึ้นของแรงดันฮอลล์แต่จะอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้า รูปที่ 2.10 (ข) แสดงโครงสร้างแมกนีโตริซิสเตอร์แบบวงกลมซึ่งเป็นโครงสร้างที่แรงดันฮอลล์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยสนามแม่เหล็กสามารถที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเลี้ยวเบนของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นกับสภาพความคล่องตัวของวัสดุอีกด้วย โดยอุปกรณ์ที่สร้างจากซิลิคอนจะมีสภาพความคล่องระดับต่ำ ซึ่งโดยปกติแล้วอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์จะเลือกสารประกอบที่มีค่าสภาพความคล่องตัวสูงในการสร้าง



(ก)



(ข)

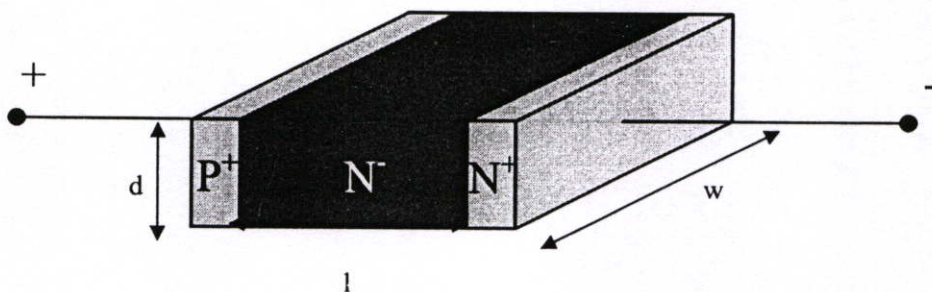
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของแมกนีโตริซิสเตอร์ (ก) แบบขนาน และ (ข) แบบวงกลม[15]

## 2.3 แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode)

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

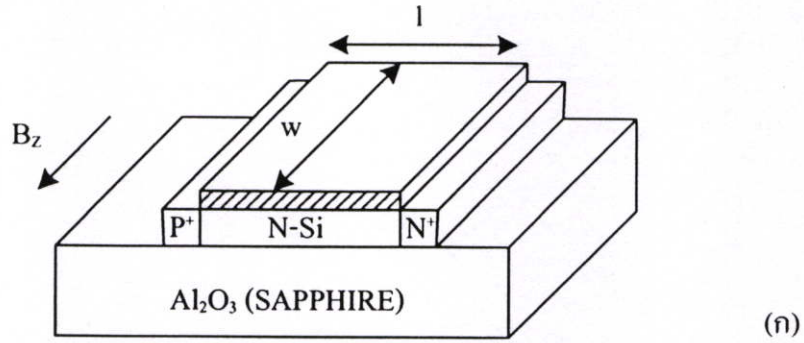
$$S_{\nu} = \frac{dV_f}{dB_z} = \frac{e(\mu_n + \mu_p)\tau_{eff}(v_2 - v_1)}{8KTI} V_f^2 \quad (2.23)$$

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

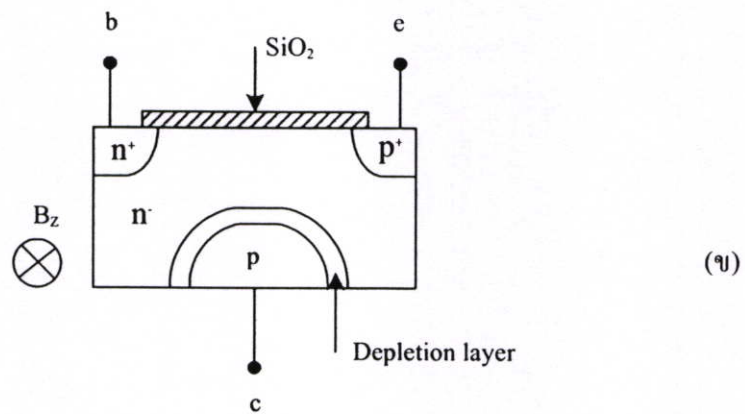


รูปที่ 2.11 โครงสร้างด้านตัดขวางของแมกนีโตไดโอด [15]

ข้อเสียของ SOS แมกนีโตไดโอด เช่น การสร้าง  $\text{Si-Al}_2\text{-O}_2$  จะเกิดขึ้นได้ยากในบริเวณผิวหน้า, ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กค่าสูงจะไม่ใช่เชิงเส้นและอุปกรณ์จะขึ้นกับอุณหภูมิเป็นสำคัญ พื้นฐานของการใช้โครงสร้างแมกนีโตไดโอดสามารถสร้างได้โดยกระบวนการสร้างพื้นฐานวงจรรวม เช่น CMOS แสดงดังรูป 2.12(ข) โครงสร้างนี้เหมือนกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่ได้รับไบอัสย้อนกลับที่รอยต่อพี-เอ็น กลายเป็นอัตราการรวมตัวที่ผิวหน้าของ SOS แมกนีโตไดโอด สนามแม่เหล็กแนวตั้งทำให้กระแสเบี่ยงเบนไปจากคอลเลคเตอร์ ดังนั้นกระแสคอลเลคเตอร์จะเปลี่ยนแปลงเมื่อแรงดันที่รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์เกิดขึ้น



(ก)



(ข)

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

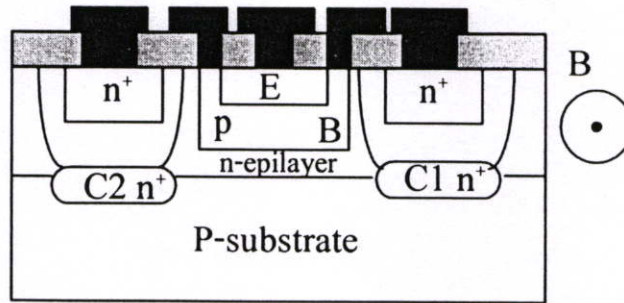
## 2.4 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor)

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

### 2.4.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง (Vertical magnetotransistor)

รูปที่ 2.13 แสดง โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ตามแนวตั้ง โดยสร้างจากกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ โครงสร้างประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด npn สองตัวต่อกันด้วยอิมิตเตอร์ร่วมและเบสร่วม มีชั้นฝัง (buried layer) อยู่ใต้ส่วนเบส คอลเลกเตอร์ทั้ง

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



รูปที่ 2.13 ด้านตัดขวาง โครงสร้างของแมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง [1]

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

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

โดยที่  $L$  คือระยะระหว่างอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์,  $W_E$  คือ ความกว้างอิมิตเตอร์ และ  $G$  คือค่าคงที่ที่ขึ้นกับโครงสร้างของอุปกรณ์ ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กหาได้โดย

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

แทนสมการที่ (2.24) ลงในสมการที่ (2.25) จะได้

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

ในสภาวะปกติขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านสามารถหาความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (2.27) และ (2.28)

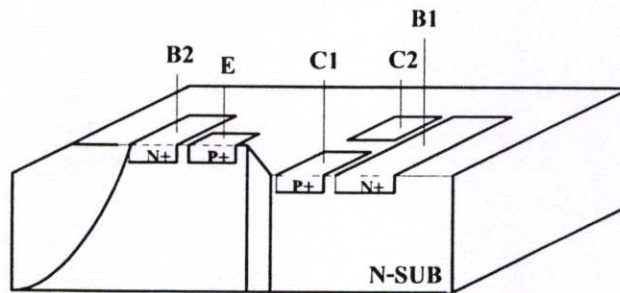
$$S_A = \left| \frac{\partial V_C}{\partial B} \right|_{B=0} = R_C^{-1} \left| \frac{\partial I_C}{\partial B} \right|_{B=0} \quad (2.27)$$

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

ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์นี้มีค่าประมาณ  $0.03/T - 0.05/T$  ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างมอสเฟต (MAGFET)

#### 2.4.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน (Lateral magnetotransistor)

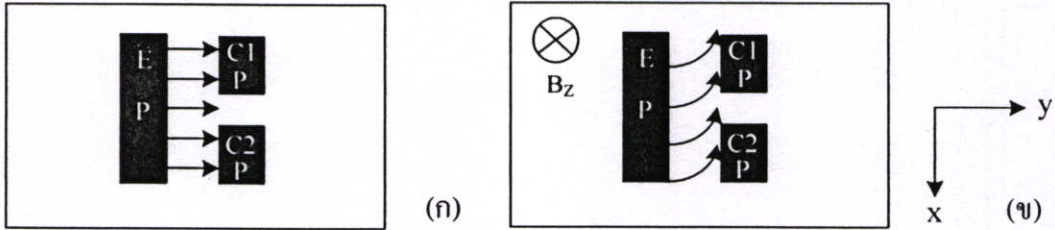
โครงสร้างโดยทั่วไปของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอนแสดงดังรูปที่ 2.14 โดยการทำงานพาหะจะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปยังคอลเลคเตอร์ที่แยกกันอยู่สองข้างอย่างสมมาตร โดยสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C$ ) กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ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



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน[15]

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

สนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ซึ่งกระทำกับประจุพาหะ ทำให้พาหะส่วนน้อยในเบสเบี่ยงเบนความหนาแน่นของประจุพาหะที่คอลเลคเตอร์ทั้งสองไม่เท่ากัน เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C \neq 0$ ) นั่นคือการเปลี่ยนแปลงจากภาวะสมดุลเป็นไม่สมดุลแสดงดังรูปที่ 2.15(ข)



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

ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์  $I_{C1}$  และ  $I_{C2}$  ได้ดังสมการที่ 2.29 เพราะฉะนั้นผลรวมของ  $I_{C1}$  และ  $I_{C2}$  คือกระแสคอลเลคเตอร์ที่ไหลในภาวะปกติ นั่นเอง ดังสมการที่ (2.30) ส่วนสมการที่ (2.31) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta I_C$  กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ซึ่ง  $\Delta I_C$  แปรผันตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสอิมิตเตอร์ ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบสัมพัทธ์และแบบสมบูรณ์แสดงได้ดังสมการที่ (2.32) - (2.33)

$$\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2} \quad (2.29)$$

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

$$\Delta I_C = K_g (\mu_p + \mu_n) \cdot B_z \cdot I_E \quad (2.31)$$

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

$K_g$  เป็นค่าคงที่ที่มีความสัมพันธ์กับรูปร่างลักษณะของตัวอุปกรณ์

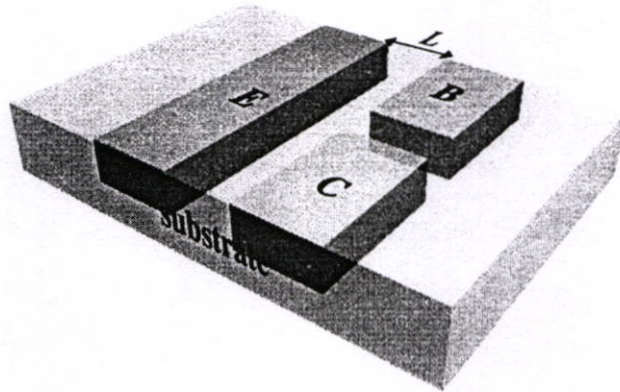
$$S_R = \frac{\Delta I_C}{I_O \cdot \Delta B_z} \quad (2.32)$$

$$S_A = \frac{\Delta V}{\Delta B_z} \quad (2.33)$$

ซึ่ง  $I_O$  คือแหล่งจ่ายกระแสคงที่และ  $\Delta B_z$  คือการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก

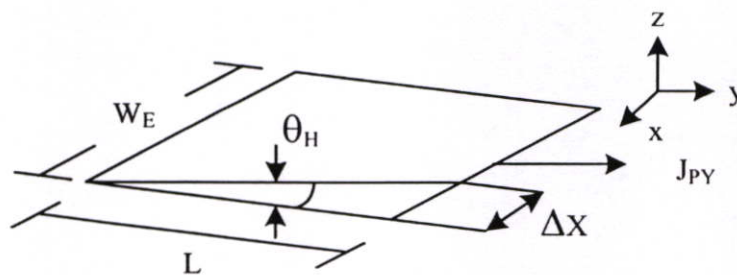
### 2.4.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (Three terminal magnetotransistor)

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



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบโครงสร้างสามขาในภาวะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กปริมาณพาหะโฮลเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ข้ามเบสไปยังคอลเลคเตอร์เป็นกระแสคอลเลคเตอร์เท่ากับปริมาณพาหะโฮลที่รวมตัว (recombination) ในเบสเป็นกระแสเบส แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตั้งฉากแนวตั้ง (ทิศทาง  $z$ ) ตัดผ่านตัวอุปกรณ์ พาหะถูกกระทำโดยแรงลอเรนซ์ ทำให้พาหะเบี่ยงเบนและเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ การวิเคราะห์การทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.17 โดยกระแสอิมิตเตอร์คือการรวมกันของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ดังสมการที่ (2.34)



รูปที่ 2.17 พื้นที่การเบี่ยงเบนของพาหะ (โฮล) ทำมุมเบี่ยงเบน  $\theta_H$

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

กระแสอิมิตเตอร์สามารถแสดงอยู่ในเทอมของปริมาณความหนาแน่นของโฮล  $J_{py}$  ดังสมการ 2.35

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

โดยที่  $W_E$  คือความกว้างอิมิตเตอร์ และ  $d$  คือความลึกรอยต่อ

การไม่สมดุลของกระแสที่มีความสัมพันธ์กับความกว้างเบส  $W_B$ , สภาพความคล่องตัวของโฮล  $\mu_p$  และความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก  $B_z$  ดังสมการที่ (2.37) กระแสไหลตามแนวอนเบียงเบนในมุม  $\theta_H$  ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ (2.36)

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

$$(\Delta X) = L \cdot \mu_p \cdot B_z \quad (2.37)$$

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

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

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

แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวอน ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับ การเบียงเบนของพาหะ (carrier deflection) เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีผลของกระแสการฉีดจากการมอดคูเลท (modulation current injection)

## 2.5 คุณสมบัติต่างๆ ไปของอุปกรณ์เซนเซอร์

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

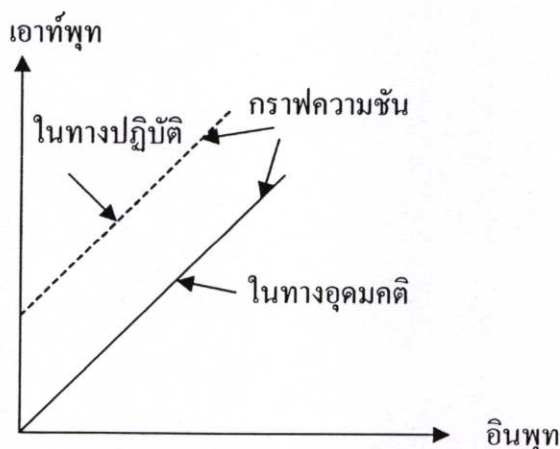
1. **ย่านวัด (Range)** เป็นการจำกัดค่าอินพุท และเอาต์พุทของเซนเซอร์ในการใช้งาน เช่น เซนเซอร์ที่ใช้วัดความดันตัวหนึ่งให้กับความดันอยู่ในช่วง 0 ถึง 7 บาร์ โดยให้กระแสด้านเอาต์พุท อยู่ในช่วง 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ เป็นต้น

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

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

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

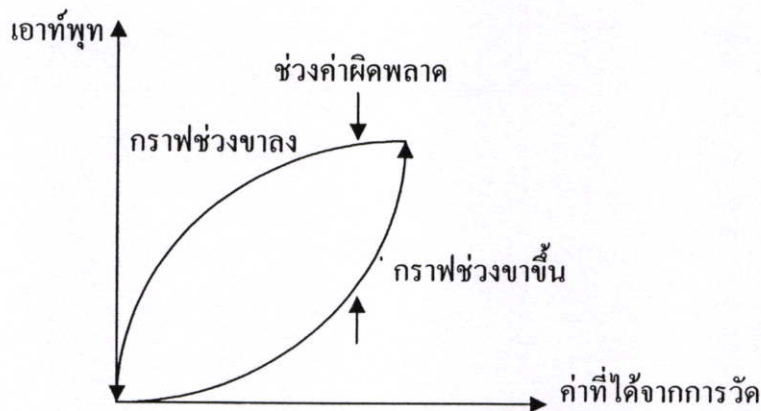
5. **ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)** หรือความแม่นยำ โดยความเป็นเชิงเส้นจะแสดงค่าที่วัดได้ว่ามีการวางตัวอย่างไรบนสเกลที่เป็นเชิงเส้น และเป็นสัดส่วน สเกลอาจจะเป็นเชิงเส้นอย่างมากแต่มีความเอียง, ความชัน หรือออฟเซ็ท จากค่าที่ถูกกำหนด



รูปที่ 2.18 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ในทางอุดมคติ

6. **ความมีเสถียรภาพ (Stability)** ความมีเสถียรภาพของอุปกรณ์วัด หมายถึง ความสามารถในการให้สัญญาณเอาต์พุตเดิม เมื่อใช้วัดสัญญาณอินพุตที่คงที่แม้เวลาจะเปลี่ยนแปลงไป คำว่า การคลาดเคลื่อนมักถูกนำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าของเอาต์พุตอันเนื่องมาจากเหตุการณ์ดังกล่าว การคลาดเคลื่อนอาจจะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์เต็มย่านวัดก็ได้ คำว่า การคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์เป็นศูนย์ถูกนำมาใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏขึ้นที่เอาต์พุตเมื่ออินพุตมีค่าเป็นศูนย์

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



รูปที่ 2.19 ฮิสเทอรีซิสสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างไปจากค่าเดิม

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

9. **ออฟเซต (Offset)** เป็นค่าเอาต์พุตของเซนเซอร์ ที่ไม่ต้องการที่อุณหภูมิห้อง หรือที่สัญญาณอินพุตเป็นศูนย์ ในกรณีของอุปกรณ์ฮอลล์ค่าออฟเซต หมายถึง ค่าแรงดันฮอลล์ในขณะที่สนามแม่เหล็กเท่ากับศูนย์

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

โดยปกติแล้วในการออกแบบกระบวนการสร้างและการทดสอบของอุปกรณ์เซนเซอร์ในความเป็นจริงจะมีคุณสมบัติไม่เป็นอุดมคติเพราะฉะนั้นจึงเป็นหน้าที่ของนักออกแบบและนักวิจัยที่จะพัฒนาอุปกรณ์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงหรือเข้าใกล้ความเป็นอุดมคติมากที่สุด โดยรายละเอียดคุณสมบัติของเซนเซอร์ในทางอุดมคติสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดคุณลักษณะของเซนเซอร์ในทางอุดมคติ

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

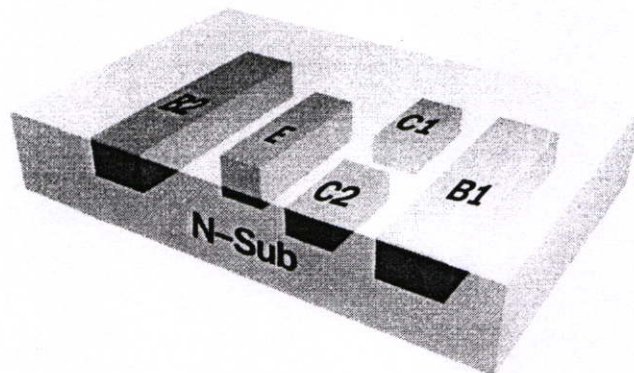
### บทที่ 3

## โครงสร้างและการออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์

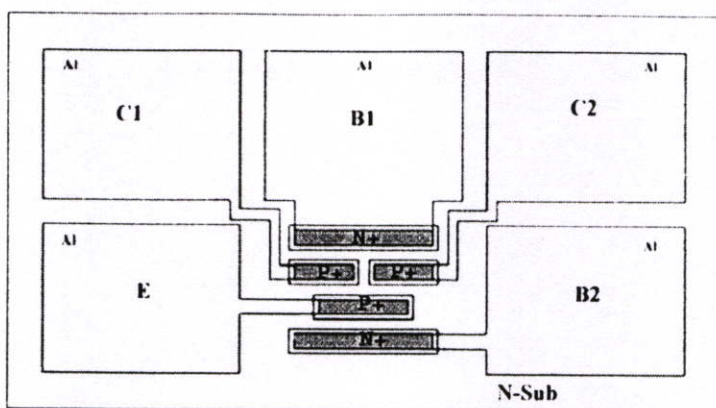
ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบห้าขาและสามขา อธิบายกลไกการทำงานและอธิบายความสัมพันธ์ทางโครงสร้างอัตราส่วน  $L/W$  ที่มีผลต่อความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาทำการศึกษาศึกษาโดยการออกแบบเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์โดยในแต่ละพารามิเตอร์ทำการเปลี่ยนแปลงระยะความกว้างเบส  $L$  และระยะระหว่างคอลเลคเตอร์ทั้งสอง  $W$  เพื่อเปรียบเทียบเอ๊าท์พุท ( $\Delta I_C$ ) และค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กและแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา รูปแบบโครงสร้างประกอบด้วย อิมิตเตอร์, เบสและคอลเลคเตอร์โดยทำการออกแบบโครงสร้างแบบปกติและโครงสร้างสองตัวรวมกระแส อีกทั้งบทนี้กล่าวถึงรูปแบบมาส์คและวิธีการออกแบบมาส์ค โดยการใช้โปรแกรม COREL DRAW ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้งสองอีกด้วย

### 3.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา

โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา ซึ่งนำมาตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยรูปที่ 3.1 เป็นภาพโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ pnp ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน คอลเลคเตอร์ทั้งสองมีขนาดสมมาตรกันและแยกออกจากกันซึ่งสร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิด P<sup>+</sup> อิมิตเตอร์สร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิด P<sup>+</sup> โดยมีความยาวคาบเกี่ยวระหว่างชั้นสารคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ส่วนของขั้วเบสสร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิด N<sup>+</sup> แบ่งเป็นสองขั้ว ซึ่งจะอยู่ด้านนอกสุดของตัวอุปกรณ์และครอบคลุมทั้งอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ ทั้งหมดสร้างบนฐานรองชนิดเอ็น



รูปที่ 3.1 ด้านตัดขวาง โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา



รูปที่ 3.2 ภาพด้านแสดงมิติโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา

รูปที่ 3.2 แสดงภาพด้านบนมิติของไบโพลาร์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตามลักษณะการออกแบบประกอบด้วย อิมิตเตอร์หนึ่งขา, คอลเลคเตอร์สองขา และเบสสองขาอธิบายหน้าที่ความสำคัญของแต่ละขาได้ดังนี้

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

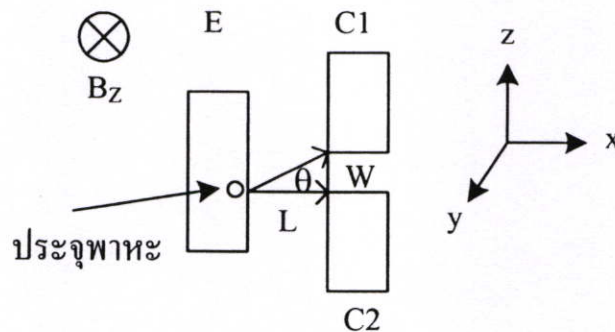
E ชั้นสารอิมิตเตอร์(Emitter) มีความยาวที่คาบเกี่ยวระหว่างชั้นสารคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากันทำให้สภาวะปกติพาหะถูกฉีดจากอิมิตเตอร์ผ่านไปยังคอลเลคเตอร์ทั้งสองชั้น ในปริมาณเท่ากัน ระยะห่างระหว่างชั้นสารอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์ทั้งสองชั้น มีผลกับประสิทธิภาพการฉีดพาหะ เนื่องจาก โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ออกแบบมี ระยะห่างระหว่างชั้นสารอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์มาก จึงจำเป็นต้องเพิ่มประสิทธิภาพการฉีดพาหะ โดยการไบอัส B1 และ B2 เพื่อให้สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการไบอัส B1 และ B2 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการฉีดพาหะของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

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

ขั้ว(Pad) ขั้วอลูมิเนียมสำหรับใช้ในการวัดทดสอบอุปกรณ์ ออกแบบให้มีขนาดใหญ่เพื่อความคล่องตัวในการตรวจวัดทดสอบ เนื่องจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้ำขาตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยการอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และกระแสการฉีดจากมอดคูเลท (modulation current injection) ซึ่งสามารถอธิบายกลไกการทำงานเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบได้ดังนี้

### 3.1.1 การเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier Deflection)

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้ำขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนดิ่งโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_c$ ) กลไกที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสองเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และอัตราการผลิตพาหะอิมิตเตอร์ (modulation current injection) ในสถานะที่มีสนามแม่เหล็กแวนดิ่งตัดผ่านอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะที่เคลื่อนที่ระหว่างอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ในระยะความยาว  $L$  แรงลอเรนซ์จะกระทำกับพาหะทำให้เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในมุม  $\theta$  ซึ่งระยะการเบี่ยงเบน  $W$  คือระยะระหว่างคอลเลคเตอร์ทั้งสอง รูปที่ 3.3 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะขณะที่มีสนามแม่เหล็กแวนดิ่งตัดผ่านในระยะความยาว  $L$  โดย  $\theta$  คือมุมเบี่ยงเบนของพาหะและ  $W$  คือระยะการเบี่ยงเบนของพาหะ



รูปที่ 3.3 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะในมุมเบี่ยงเบน  $\theta$

จากทฤษฎีสอลล์ซึ่งอธิบายจากบทที่ 2 มุมการเบี่ยงเบนของพาหะหาได้จากสมการที่ 2.36 แสดงได้โดย

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

จากรูปที่ 3.3 สามารถแสดงความสัมพันธ์ทางโครงสร้างได้ดังนี้

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

จะได้

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

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

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

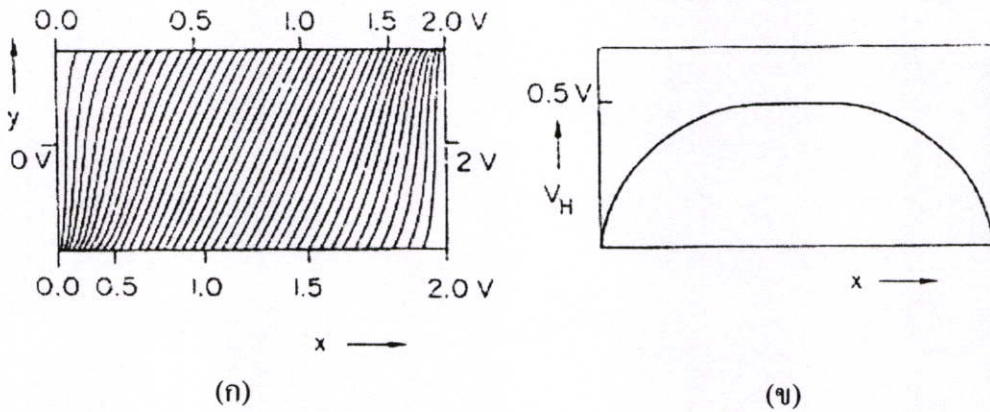
แทนสมการที่ 3.1 ลงในสมการที่ (3.2) จะได้ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์โครงสร้างแสดงได้โดยสมการที่ (3.3)

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

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

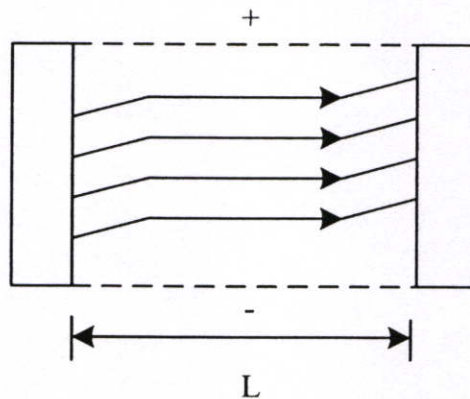
ในการพิจารณาการกำหนดระยะความยาว L สามารถทำการศึกษาจากทฤษฎีฮอลล์โดยที่รูปที่ 3.4(ก)แสดงเส้นศักย์เท่ากัน (equipotential lines) ของอุปกรณ์ฮอลล์ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทำให้พาหะเคลื่อนที่ในมุมเบี่ยงเบนที่คงที่ ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ในบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ฮอลล์ทำให้เกิดแรงดันฮอลล์ได้สมบูรณ์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

เพราะฉะนั้นการออกแบบเพื่อกำหนดตำแหน่งของขั้ววัดแรงดันฮอลล์โดยส่วนใหญ่แล้วจะ ออกแบบให้อยู่ตรงกลางของอุปกรณ์ฮอลล์



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

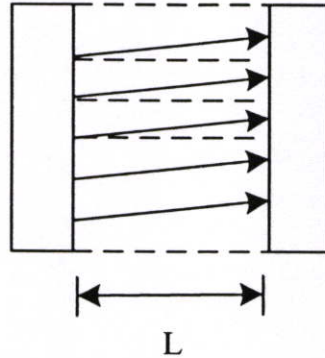
จากการวิเคราะห์ในรูปที่ 3.4 สามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ได้โดยในการออกแบบจะกำหนดระยะความยาว  $L$  เป็นระยะระหว่างอิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์ ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา โดยอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีความยาว  $L$  รูปที่ 3.5 แสดงการเหนี่ยวนำ สนามไฟฟ้าเนื่องจากสนามแม่เหล็กได้สมบูรณ์ในบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ นั่นคือ กระแสไฟฟ้าจะมีทิศทางเคลื่อนที่ในแนวตรง ซึ่งทิศทางกระแสไฟฟ้าในบริเวณใกล้ขั้วของ อุปกรณ์จะมีการเบี่ยงเบนเพราะสนามไฟฟ้าไม่สามารถเหนี่ยวนำได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3.5 การเกิดแรงดันฮอลล์ที่ระยะความยาว  $L$  ของอุปกรณ์ฮอลล์

รูปที่ 3.6 แสดงการลดลงของความยาว  $L$  ซึ่งสามารถแสดงการเบี่ยงเบนได้ชัดเจน เนื่องจากสนามแม่เหล็กไม่สามารถเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าได้สมบูรณ์ทำให้กระแสเกิดการ เบี่ยงเบนได้อย่างชัดเจน ( $\Delta I_C$ ) ซึ่งลักษณะของกระแสที่เบี่ยงเบนจะเป็นพื้นฐานในการออกแบบ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ นั่นคือแสดงให้เห็นว่าระยะความยาว  $L$  ไม่สามารถที่จะออกแบบให้มี

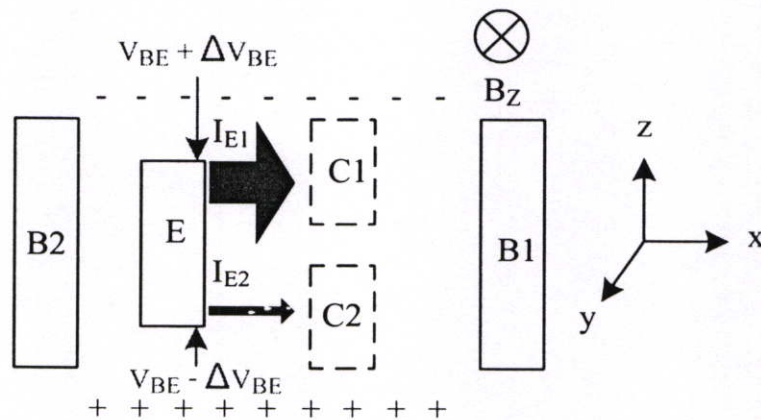
ความยาวที่ยาวมากได้ การออกแบบจึงกำหนดระยะความยาวเบส  $L$  ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ หัวขาที่ระยะ  $10\ \mu\text{m}$  และ  $20\ \mu\text{m}$  เพื่อแสดงการเปรียบเทียบเอาท์พุทที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.6 การลดลงของความยาว  $L$  ที่มีผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า

### 3.1.2 กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (Modulation Current Injection)

การตรวจจับสนามแม่เหล็กแฉวคิ่งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์หัวขานั้นนอกจากอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) แล้วยังอาศัยกลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองเนื่องจากกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท(modulation current injection)อีกด้วย พิจารณาจากรูปที่ 3.7 สนามแม่เหล็กทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะซึ่งทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันที่บริเวณด้านบนและด้านล่างของอุปกรณ์ บริเวณรอยต่ออิมิตเตอร์-เบสด้านบนมีแรงดันตกคร่อมรอยต่อมากขึ้น ( $V_{BE} + \Delta V_{BE}$ ) เนื่องจากการเกิดแรงดันฮอลล์ ซึ่งแตกต่างกับกรณีบริเวณรอยต่ออิมิตเตอร์-เบสด้านล่างที่แรงดันตกคร่อมรอยต่อมีค่าลดลง ( $V_{BE} - \Delta V_{BE}$ ) เพราะผลจากสนามไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไบอัสไปข้างหน้า ทำให้พาหะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์บริเวณด้านบนมากกว่าด้านล่าง ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองได้



รูปที่ 3.7 กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากผลของกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท

ในการวิเคราะห์สมการกระแสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถอธิบายจากสมการกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ปกติโดยสมการอัตราขยายกระแสของทรานซิสเตอร์ในวงจรเบสร่วมหรือค่าของอัลฟา ( $\alpha$ ) แสดงได้ดังสมการที่ (3.4)

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

เนื่องจากรอยต่ออิมิตเตอร์-เบสได้รับไบอัสตรงทำให้พาหะถูกฉีดจากอิมิตเตอร์เข้าไปในเบสกลายเป็นกระแสอิมิตเตอร์ซึ่งในสภาวะปกติไม่มีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านแสดงได้โดยสมการที่ (3.5)

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

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

สนามแม่เหล็กแนวตั้งทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะซึ่งจะเกิดประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่างด้านบนและด้านล่างของอุปกรณ์แสดงการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานไฟฟ้าบริเวณรอยต่ออิมิตเตอร์-เบสด้านบนและด้านล่างของอิมิตเตอร์ การเปลี่ยนแปลงของกระแสอิมิตเตอร์สามารถแสดงได้ดังนี้

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

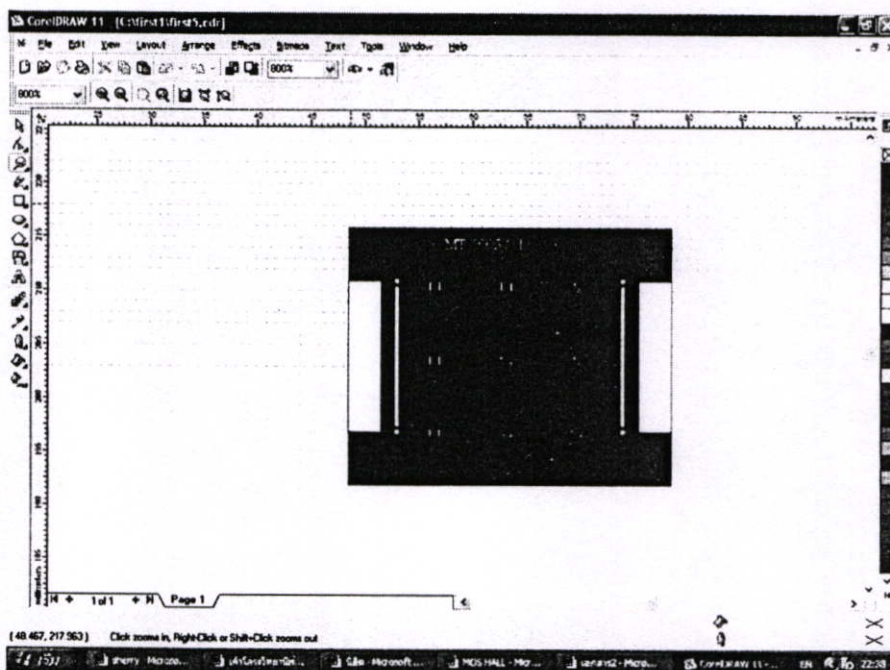
โดยที่  $\Delta V_{BE}$  คือ แรงดันตกคร่อมระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ที่เพิ่มขึ้นจากกระแสการฉีดจากการมอดคูเลทเนื่องจากแรงดันฮอลล์

จะได้

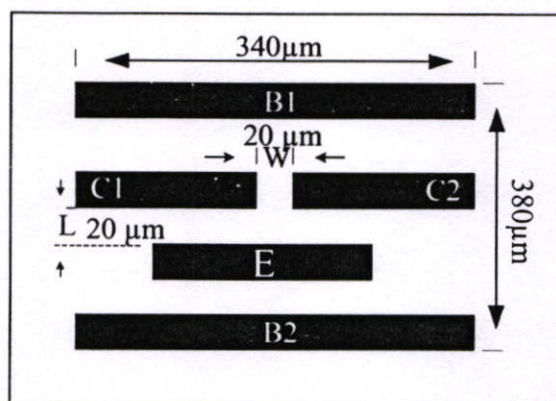
$$I_E = I_{E0} + \Delta I_E \quad (3.6)$$

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

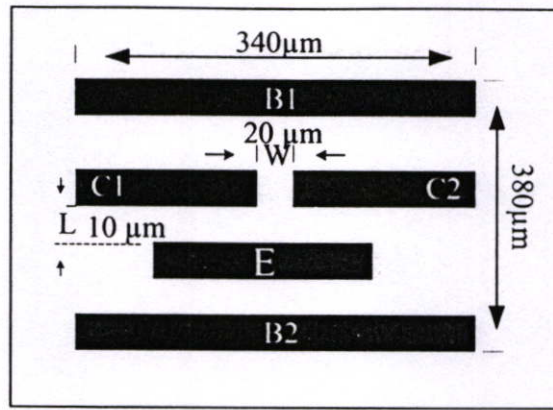
การออกแบบแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 แสดงมิติของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาโดยออกแบบเปรียบเทียบระยะระหว่างคอลเลกเตอร์ทั้งสอง (W) และระยะระหว่างอิมิตเตอร์กับคอลเลกเตอร์ (L) ซึ่งในการออกแบบมีค่า W และ L ดังนี้ พารามิเตอร์ที่ 1  $W = 20\mu\text{m}$ ,  $L = 20\mu\text{m}$  พารามิเตอร์ที่ 2  $W = 20\mu\text{m}$ ,  $L = 10\mu\text{m}$  พารามิเตอร์ที่ 3  $W = 10\mu\text{m}$ ,  $L = 20\mu\text{m}$  พารามิเตอร์ที่ 4  $W = 10\mu\text{m}$ ,  $L = 10\mu\text{m}$  โดยทำการออกแบบด้วยโปรแกรม COREL DRAW ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 หลังจากนั้นทำการถ่ายมาสก์บนฟิล์มเพื่อใช้ในการสร้างต่อไป



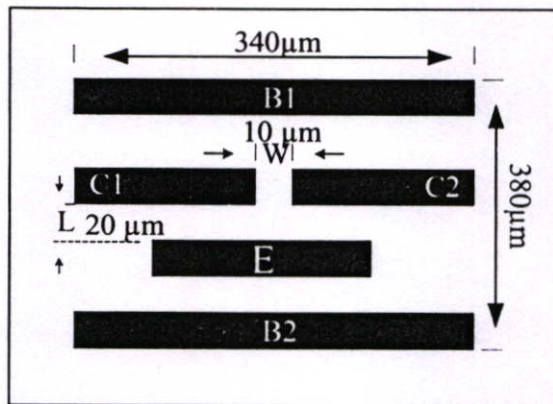
รูปที่ 3.8 โปรแกรม COREL DRAW สำหรับการออกแบบลวดลายต้นแบบ



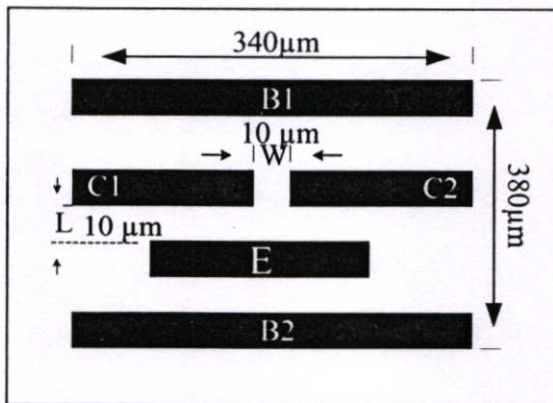
(ก) พารามิเตอร์ที่ 1  $W=20\mu\text{m}$ ,  $L=20\mu\text{m}$



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



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



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

รูปที่ 3.9 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ทำการออกแบบที่ค่า  $W$  และค่า  $L$  ต่างๆ

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

ในการออกแบบทำการตัดต้นแบบทั้งหมด 4 มาสก์ ซึ่งประกอบด้วย

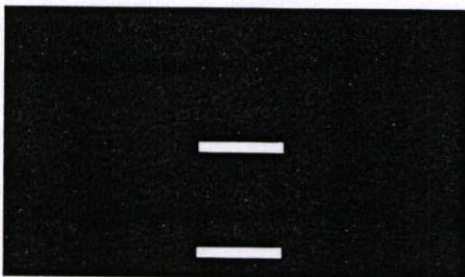
มาสก์ที่ 1 : Base Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สำหรับสร้างชั้นเบสทั้งสอง โดยการ  
แพร่อะตอมสารเจือโบรอน ( $N^+$ )

มาสก์ที่ 2 : Emitter, Collector Mask โดยการเปิดช่องออกไซด์ และแพร่อะตอมสารเจือ  
ฟอสฟอรัส ( $P^+$ ) สร้างอิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์

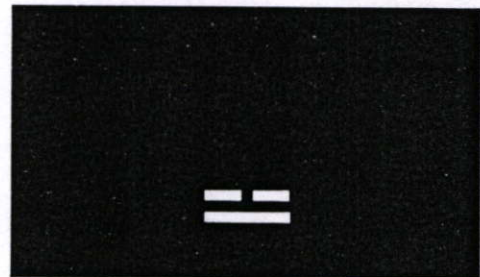
มาสก์ที่ 3 : Contact Windows Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้เปิดช่องบริเวณที่จะสร้าง  
ขั้วสัมผัสระหว่าง อะลูมิเนียม กับสารกึ่งตัวนำเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้า หรือจุดเชื่อมต่อในวงจรรวม

มาสก์ที่ 4 : Aluminum Mask เป็นต้นแบบสำหรับกระบวนการเมทัลไลเซชัน เพื่อสกัดชั้น  
อะลูมิเนียม เฉพาะส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้า

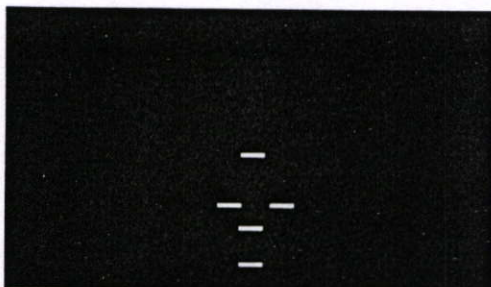
MASK 1 Base mask



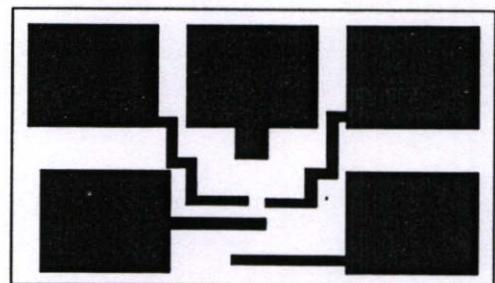
MASK 2 Emitter, Collector mask



MASK 3 Contact window mask



MASK 4 Aluminum mask



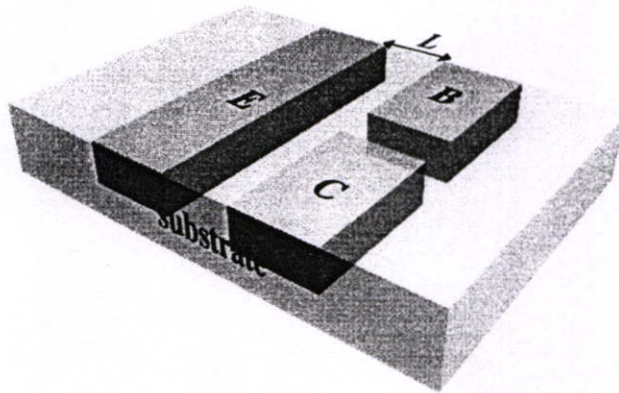
รูปที่ 3.10 ลวดลายต้นแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา

## 3.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

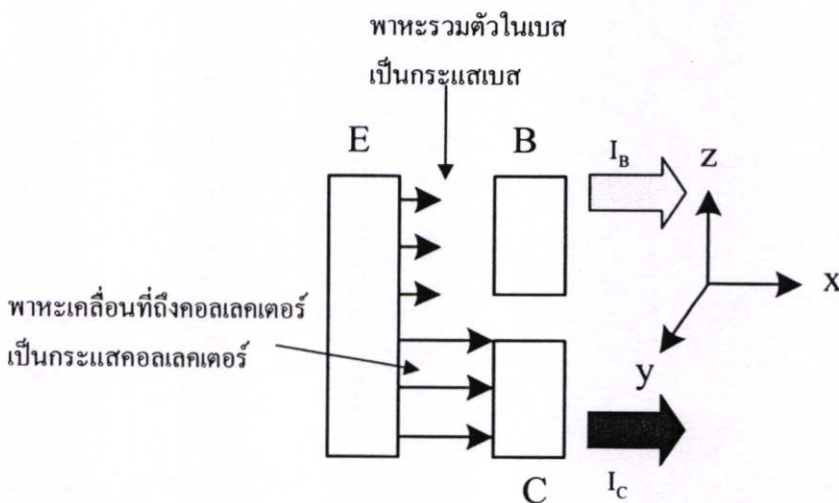
### 3.2.1 โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

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

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



รูปที่ 3.11 รูปโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา [11]



รูปที่ 3.12 ทิศทางกระแสไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

รอยต่ออิมิตเตอร์-เบสได้รับแรงดันไปข้างหน้าทำให้พาหะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปสู่เบสกลายเป็นกระแสอิมิตเตอร์โดยแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถแสดงกระแสอิมิตเตอร์โดยการรวมกันของกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์ดังอธิบายจากบทที่ 2 แสดงได้ดังสมการที่ (2.31)

$$I_E = I_B + I_C$$

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

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

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

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

จากสมการที่ (3.8) แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีความสัมพันธ์กับระยะความกว้างเบส  $L$  โดยที่ไม่มีผลของระยะ  $W$  เนื่องจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาอาศัยพาหะที่รวมตัวในเบสเป็นกระแสเบสระยะการเบี่ยงเบนจึงไม่มีผลต่อเอาต์พุตของอุปกรณ์เสมือนระยะ  $W$  เท่ากับศูนย์ โดยในการออกแบบระยะความยาวเบส  $L$  จะกำหนดที่ระยะ  $20 \mu\text{m}$  ซึ่งเปรี๊ยะที่คาดว่าจะได้เอาต์พุตที่ดีที่สุดดังอธิบายแล้วในแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา ออกแบบความยาวอิมิตเตอร์ให้มีขนาดครอบคลุมส่วนเบสและส่วนคอลเลกเตอร์โดยขนาดของเบสและคอลเลกเตอร์มีขนาดเท่ากัน

### 3.2.2 โครงสร้างสองตัวรวมกระแส

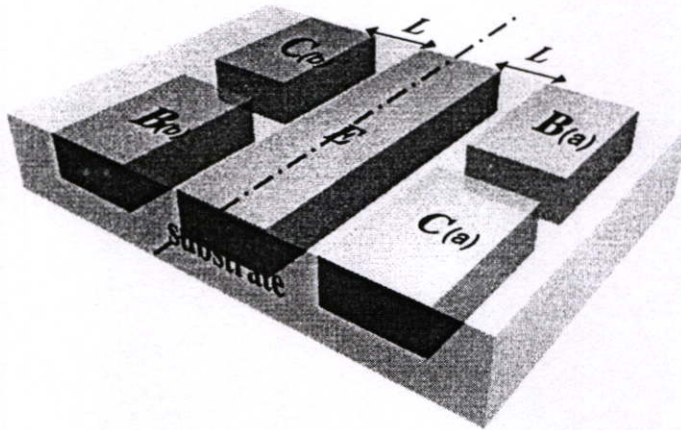
การศึกษาแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขานี้ นอกจากโครงสร้างแบบปกติแล้วยังทำการศึกษาโครงสร้างสองตัวรวมกระแสโดยการทำงานอาศัยการรวมกันของกระแสเบส ( $I_{B(a)} + I_{B(b)}$ ) กับกระแสคอลเลกเตอร์ ( $I_{C(a)} + I_{C(b)}$ ) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้งสอง (MT(a) และ

MT(b)) ตรวจสอบนามแม่เหล็กแนวตั้งโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) การออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาโครงสร้างสองตัวรวมกระแส ดังแสดงรูปที่ 3.13 ประกอบด้วยอิมิตเตอร์หนึ่งขั้ว, คอลเลคเตอร์สองขั้วและขั้วเบสสองขั้ว ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์แสดงได้โดยสมการที่ (3.9)

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

สมการความไวในการตรวจสอบนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา โครงสร้างสองตัวรวมกระแสสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.10) ซึ่งจากการทำงานทำให้ค่าเอาต์พุตที่ได้มีค่าเป็นสองเท่าเปรียบเทียบกับ โครงสร้างตัวเดี่ยวนั้นคือทำให้ค่าความไวในการ ตรวจสอบนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าอีกด้วย

$$S = \frac{2\Delta I_{CB}}{\Delta B} \quad (3.10)$$



รูปที่ 3.13 ด้านตัดขวางโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาแบบสองตัวรวมกระแส [11]

การออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่มีรูปแบบ โครงสร้างสองตัวรวมกระแส กำหนดระยะความกว้างเบส  $L = 20\mu\text{m}$  โดยความยาวอิมิตเตอร์ครอบคลุมขั้วเบสและคอลเลคเตอร์ โดยที่ขั้วเบสและคอลเลคเตอร์มีขนาดเท่ากันและสมมาตรกันเนื่องจากพหุมีทิศทางการเคลื่อนที่ เบี่ยงเบนแตกต่างกันสองทิศทาง โครงสร้างนี้จึงสามารถแสดงค่าเอาต์พุตที่สูงกว่าแบบปกติได้ การออกแบบมาส์คของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาทำการออกแบบด้วย โปรแกรม COREL DRAW หลังจากนั้นทำการถ่ามาส์คลงบนฟิล์มเพื่อใช้ในการสร้างต่อไป

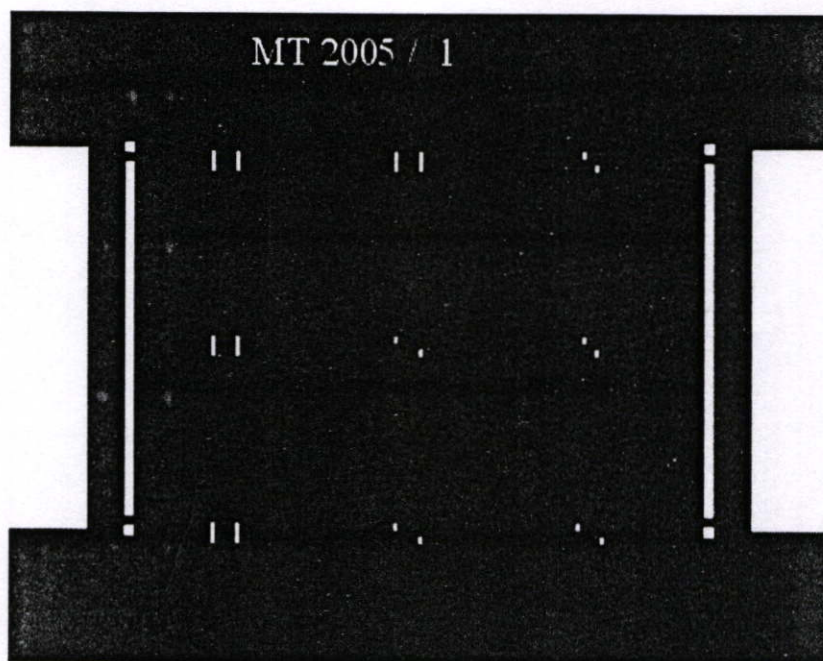
ในการออกแบบทำการตัดต้นแบบทั้งหมด 4 มาส์คดังแสดงรูปที่ 3.14 ซึ่งประกอบด้วย

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

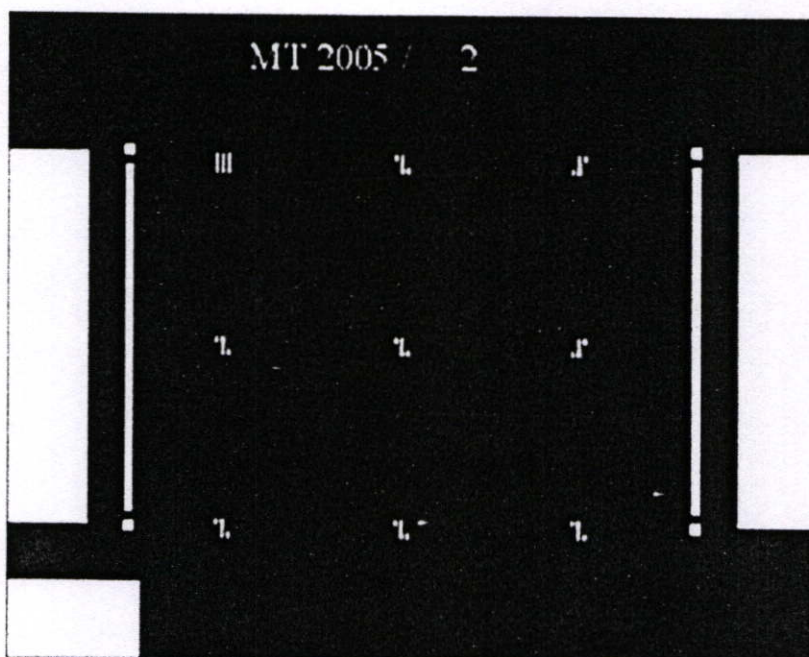
มาส์คที่ 2 : Emitter, Collector Mask โดยการเปิดช่องออกไอซ์ และแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส ( $P^+$ )

มาส์คที่ 3 : Contact Windows Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้เปิดช่องบริเวณที่จะสร้างขั้วสัมผัสระหว่าง อะลูมิเนียม กับสารกึ่งตัวนำเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้า หรือจุดเชื่อมต่อในวงจรรวม

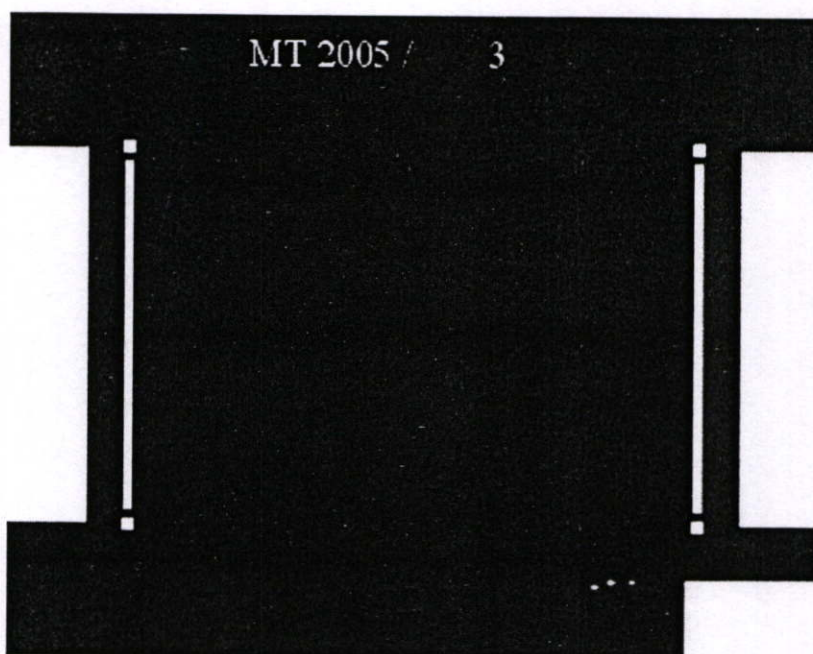
มาส์คที่ 4 : Aluminum Mask เป็นต้นแบบสำหรับกระบวนการเมทัลไลเซชัน เพื่อสกัดชั้นอะลูมิเนียม เฉพาะส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้า



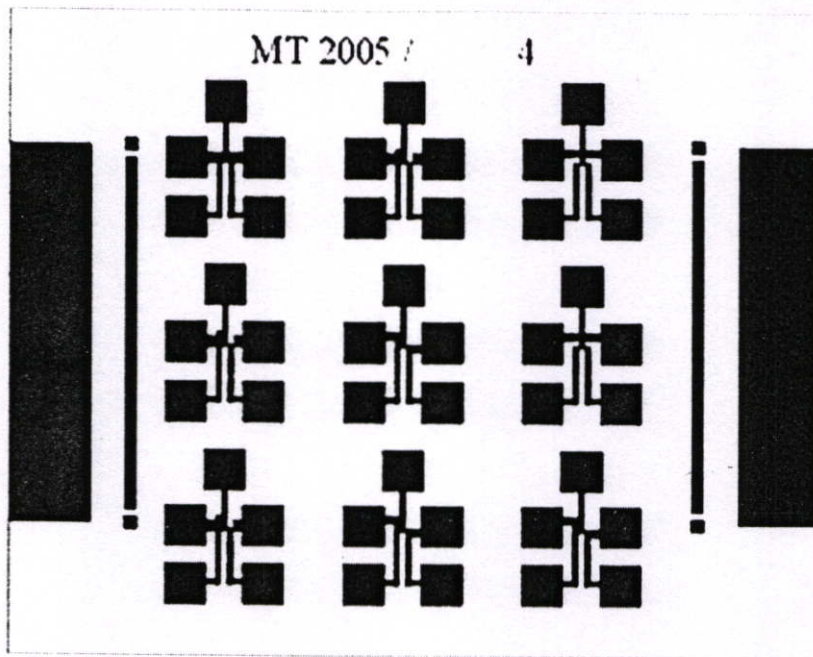
(ก) Base Mask



(๑) Emitter, Collector Mask



(๒) Contact Window Mask



(จ) Aluminum Mask

รูปที่ 3.14 ลวดลายต้นแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

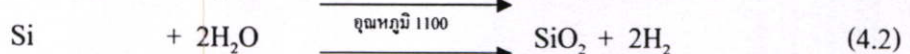
## บทที่ 4

# เทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้าง

ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ การสร้างออสซิลเลเตอร์ เทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประกอบด้วย กระบวนการออกซิเดชัน, กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี, กระบวนการแพร่สารเจือและกระบวนการเมทัลไลเซชัน กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ออสซิลเลเตอร์เทคโนโลยีการสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์โดยจะเริ่มต้นจากนำแผ่นซิลิคอนเพื่อนำใช้เป็นส่วนเบสจากนั้นทำการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันซึ่งการกำหนดกระบวนการสร้างในแต่ละขั้นตอนจะขึ้นกับวัสดุที่ทำการออกแบบไว้โดยที่บางส่วนของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จะถูกสกัดออกเพื่อเป็นช่องทางให้สารเจือแพร่เข้าไปในผลึกซิลิคอน การแพร่สารเจือสำหรับการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์อาศัยการแพร่สองครั้งเพื่อสร้างส่วนเบสและอิมิตเตอร์, คอลเลกเตอร์ ตามลำดับ จากนั้นสร้างขั้วอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการเมทัลไลเซชันและกระบวนการซินเตอร์เป็นขั้นตอนสุดท้าย แมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาและสามขามีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและกระบวนการสร้างที่สร้างได้ง่ายสามารถสร้างได้ที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

### 4.1 กระบวนการออกซิเดชัน

ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) นี้จะเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสง ใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ได้เป็นอย่างดี และยังใช้ควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้สามารถสร้างได้ด้วยการอบออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal Oxidation) โดยการทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้ง หรือน้ำ ในบรรยากาศซึ่งมีอุณหภูมิสูง โดยมีสมการทางเคมีแสดงได้ดังนี้



สำหรับกลไกการเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ เกิดจากก๊าซออกซิเจนแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นก่อนหน้านั้น เข้าไปจนถึงผิวหน้าสัมผัสระหว่างซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อทำปฏิกิริยาเคมี การสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยการอบดังกล่าวนี้ ทำให้ 2 ลักษณะคือ

#### 4.1.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์ปราศจากสารอื่นใดเจือปน ที่อุณหภูมิสูง  $900^{\circ}\text{C} \sim$  ประมาณ  $1100^{\circ}\text{C}$  จะทำให้อะตอมของซิลิคอนรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ ดังสมการ 2.38 เตาที่ใช้ในการ oxidation สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแน่นอน (ผิดพลาด  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ) เตาดังกล่าวนี้จะแบ่งออกเป็น 3 หรือ 4 คอน แต่ละคอนสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยไม่เกี่ยวข้องกัน

#### 4.1.2 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

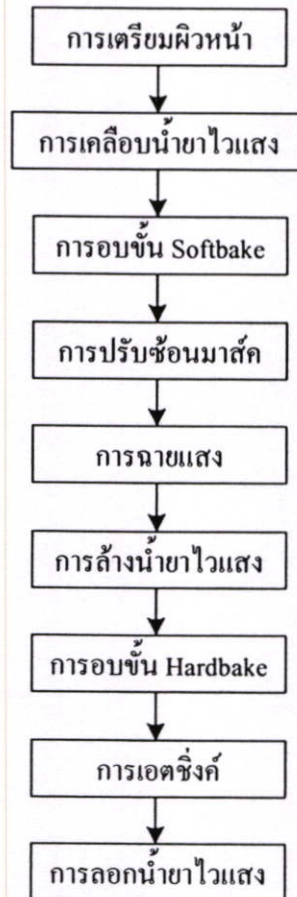
เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิคอน กับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวนี้แสดงดังในสมการ 2.39 สำหรับการออกซิเดชันแบบชื้นทำให้เกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้เร็วกว่าแบบแห้งทั้งนี้เนื่องจาก โมเลกุลของน้ำเล็กกว่า โมเลกุลของออกซิเจน จึงทำให้อะตอมของซิลิคอนเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่า แต่ข้อเสียของชั้นออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชันแบบชื้นนี้คือมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่เร็วกว่าแบบแห้งหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาแบบแห้งมีความหนาแน่นมากกว่าแบบชื้นจึงมีประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ตัวของอะตอมสารเจือได้ดีกว่าและเนื่องจากการออกซิเดชันแบบชื้นจะทำให้สภาพผิวของผลึกไม่สมบูรณ์คือการบิดเบือนของผลึก ( crystal dislocation ) เกิดรูพรุนขึ้น

### 4.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

โดยทั่วไปแล้วเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี ถูกนำมาใช้สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวมเพื่อการสกัด หรือเอตซิงค์ (etching) ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วน ที่เคลือบอยู่บนผิวผลึกซิลิคอนออก เพื่อการแพร่อะตอมของสารเจือ (impurity atom) เข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอน ทำให้เกิดส่วนต่างๆ ของตัวอุปกรณ์ เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น ซึ่งลำดับขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการนี้สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.1

เริ่มต้นจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์อยู่ที่ผิวด้านบน ไปเคลือบผิวหน้าด้านด้วยน้ำยาไวแสง จากนั้นนำไปฉายแสงโดยผ่านกระจกหลายชั้นแบบ ที่เรียกว่าโฟโตมาสก์ (photo mask) ซึ่งทำหน้าที่เป็นต้นแบบ มีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจก ซึ่งได้มาจากการออกแบบ (design) แสงที่ฉายผ่านกระจกโฟโตมาสก์ จะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสง จึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณที่ไม่ถูกแสง ปฏิกิริยาเคมี-แสงที่เกิดขึ้น จะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่นผลึกนี้ไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป

บางส่วนจะคงเหลือค้าง อยู่บนผิวของซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยาไวแสง ชั้นของน้ำยาไวแสงที่เหลือปกคลุมอยู่บนผิวซิลิคอนไดออกไซด์ จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณนี้ ถูกกัด หรือเอตซิงค์ ด้วย “สารตัวกัด” หรือเอตเชนท์ (etchant)



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

เช่น กรดกัดแก้ว (HF) เป็นต้น ซึ่งในขั้นตอนของการเอตซิงค์ แผ่นผลึกจะถูกนำไปทำปฏิกิริยาเคมีกับสารเคมีที่เป็นสารตัวกัด หรือ เอตเชนท์ ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะสามารถกัดหรือละลายชั้นของออกไซด์ออกไปได้ ในที่สุด หลังจากนั้น เมื่อชั้นของน้ำยาไวแสงถูกลอกออกก็จะปรากฏภาพ หรือลวดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้น โดยมีลักษณะเป็นลวดลายเหมือนกับลวดลายบนกระจกโฟโตมาส์ก การเกิดภาพลวดลายได้ ก็เพราะชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนถูกกัดออกไปนั่นเอง คล้ายกับการสักรีดหิน

#### 4.2.1 การเตรียมผิวหน้าแผ่น

โดยปกติแล้วน้ำยาไวแสงจะถูกนำมาใช้งาน หรือถูกเคลือบบนผิวของวัสดุชนิดต่างๆ หลายชนิด แล้วแต่งานที่ต้องการทำ เช่น ชั้นออกไซด์ ชั้นซิลิคอน ชั้นอะลูมิเนียม เป็นต้น ดังนั้น การเตรียมผิวหน้าของแผ่นผลึก ก่อนที่จะเคลือบน้ำยาไวแสง บนผิวสารต่างชนิดกัน จะมีวิธีการเตรียมผิวที่ต่างกัน อย่างไรก็ตาม วัสดุที่ใช้มากที่สุดก็คือ ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งการเตรียมผิวหน้าของชั้น ซิลิคอนไดออกไซด์ ทำได้โดยเริ่มจากการกำจัดความชื้น หรือโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในชั้นออกไซด์เพราะโดยปกติ ผิวของชั้นออกไซด์นี้ จะดูดซับไอน้ำ หรือความชื้นจากอากาศได้ดี การกำจัดความชื้นทำได้โดยการอบ ซึ่งเรียกว่า Pre bake หรือ dehydration bake ที่อุณหภูมิราว 200-250 °C นาน 30 นาที ภายหลังจากการอบ ถ้าหากนำออกมาทิ้งไว้นานเกินกว่า 1 ชั่วโมง ชั้นของออกไซด์จะดูดซับความชื้นเข้าไปอีก จำเป็นต้องทำการอบใหม่ ดังนั้น เมื่ออบเสร็จแล้วควรดำเนินการ เคลือบน้ำยาไวแสงทันที นอกจากนี้ ก่อนเคลือบน้ำยาไวแสง อาจใช้สารพิเศษที่เรียกว่า Hexa Methyl Disilazane (HMDS) ฉีดพ่น หรืออบไอรระเหย เพื่อช่วยให้ผิวสามารถยึดติดกับน้ำยาไวแสงได้ดียิ่งขึ้น เพราะสารนี้จะช่วยกำจัด โมเลกุลของน้ำ ออกจากชั้นผิวของออกไซด์โดยทั่วไป ในเครื่องสปินเนอร์ จะมีหัวฉีดสเปรย์ของสาร HMDS แล้วปั่น หรือหมุนให้แห้ง จากนั้นจึงจะทำการเคลือบน้ำยาไวแสง

#### 4.2.2 การเคลือบน้ำยาไวแสง

การเคลือบน้ำยาไวแสง ลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ หรือชั้นวัสดุอื่น ๆ อยู่ที่ผิวด้านบนนั้น สามารถกระทำได้หลายวิธีซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสม หรือประเภทของงานที่ใช้ ซึ่งอาจสรุปได้ดังนี้ คือ

##### 4.2.2.1 แบบสปินเนอร์ (Spinner)

เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด สำหรับการเคลือบน้ำยาไวแสง ลงบนแผ่นผลึกวงกลม การเคลือบน้ำยาไวแสงวิธีนี้ จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า หัวหมุน หรือสปินเนอร์ โดยมีแท่นหมุนที่สามารถปรับความเร็วได้ด้วยมอเตอร์ความเร็วรอบสูง แผ่นผลึกจะถูกวางลงบนแท่นหมุน และถูกยึดติดด้วยระบบสุญญากาศ จากนั้นน้ำยาไวแสงจะถูกหยดลง บริเวณตรงกลางของแผ่นผลึก ด้วยปริมาณที่พอเหมาะ เมื่อแผ่นผลึกถูกหมุน (spin) ด้วยความเร็วรอบราว 3000-6000 rpm/min ใช้เวลาประมาณ 10-30 วินาที น้ำยาไวแสงจะถูกแรงเหวี่ยง ทำให้กระจายออกไปโดยรอบ เป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนผิวของแผ่นผลึก ความหนาของฟิล์มสารไวแสงที่ได้ มีค่าทั่วไปประมาณ 1000-2000 Å ถ้าหากความเร็วรอบต่ำเกินไป ชั้นของสารไวแสงจะหนามาก แต่ถ้าความเร็วรอบสูงๆ ความหนาของชั้นสารไวแสงจะไม่เท่ากัน โดยบริเวณขอบของแผ่นผลึกจะหนามาก ในขั้นตอนนี้ ต้องระมัดระวังฝุ่นละอองเป็นพิเศษ ดังนั้นจึงทำภายในห้องสะอาด หรือ clean room ซึ่งฝุ่นละอองในอากาศในห้องนี้ จะถูกควบคุม ให้มีขนาดเล็กและจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยใช้ระบบกรองฝุ่นประสิทธิภาพสูง (HEPA Filter) ระดับของความสะอาดจะขึ้นอยู่กับ ขนาด และจำนวน

ฝุ่นละอองในอากาศ โดยปกตินิยมใช้ค่าความหนาแน่น ของฝุ่นละอองขนาด 0.5 ไมโครเมตรใน ปริมาตร 1 ลูกบาศก์ฟุตเป็นมาตรฐาน ค่าของระดับความสะอาดของห้องสะอาดแสดงได้ดังใน ตาราง 4.1

ตาราง 4.1 แสดงค่าของระดับความสะอาดของห้องสะอาด (clean room)

ลำดับชั้น ห้องสะอาด	จำนวนอนุภาคขนาด 0.5 $\mu\text{m}$ ต่อลูกบาศก์เมตร	จำนวนอนุภาคขนาด 5 $\mu\text{m}$ ต่อลูกบาศก์เมตร
10,000	10,000 (350,000)	65 (23,000)
1,000	1,000 (35,000)	6.5 (2,300)
100	100 (3,500)	0.65 (230)
10	10 (350)	0.065 (23)
1	1 (35)	0.0065 (2.3)

#### 4.2.2.2 แบบสเปรย์ (Spray Coating)

วิธีการนี้ น้ำยาไวแสงจะถูกฉีด หรือพ่นออกมาให้เป็นละออง แล้วตกลงไปเกาะกับผิวหน้า ของแผ่นผลึกและยึดเกี่ยวกันเป็นแผ่นฟิล์มบาง คล้ายกับการพ่นสีสเปรย์ซึ่งใช้ง่าย และสะดวกแต่ เหมาะกับเฉพาะงานบางประเภท การควบคุมความหนาของฟิล์มที่ได้ทำได้ยาก ปกติจะใช้ในบาง ชั้นตอนซึ่งไม่สำคัญ เช่น ใช้เคลือบสารไวแสงเพื่อป้องกัน ชั้นออกไซด์ ด้านล่างของแผ่นผลึก

#### 4.2.2.3 แบบใช้ลูกกลิ้ง (Roller Coating)

การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีแบบใช้ลูกกลิ้ง จะนิยมทำในขั้นตอนของการตัดแยกแผ่น ผลึกซิลิคอนเป็น หรือชิพ (chip) โดยแผ่นผลึกจะถูกเคลือบด้วยน้ำยาไวแสง ทั้ง 2 ด้านเพื่อป้องกัน เศษฝุ่นละออง หรือสิ่งสกปรกอื่นที่จะเกิดขึ้นขณะทำการตัดแยกชิพ ด้วยเลื่อย (sawing) หรือแสง เลเซอร์ ปกติวิธีนี้จะใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก

#### 4.2.3 การอบชั้น Prebake หรือ Softbake

ภายหลังการเคลือบน้ำยาไวแสงแล้ว จะต้องนำแผ่นผลึกไปอบ เพื่อให้ชั้นของน้ำยาไวแสง แห้งสนิท ก่อนจะนำไปทำขั้นตอนต่อไป การอบในขั้นนี้ เรียกว่า prebake หรือ softbake ซึ่งใช้ อุณหภูมิราว 90-100 °C สำหรับน้ำยาไวแสงชนิดลบ ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดบวกอุณหภูมิที่ใช้จะ ต่ำลงเล็กน้อยคือ 80-90 °C การอบที่ใช้เวลานานเกินไป หรืออุณหภูมิที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิด ความเสียหายกับชั้นน้ำยาไวแสงได้ เช่น เกิดมีปฏิกิริยาเคมี – ความร้อน หรืออาจไหม้ได้ การอบมี หลายวิธีซึ่งสามารถกระทำได้ เช่น ใช้เตาอบแบบพาความร้อน (convection oven) ซึ่งในตู้อบจะมี พัดลมช่วยพัดไอร้อนจากขดลวดความร้อน หรือฮีตเตอร์ (heater) ขึ้นมาผ่านแผ่นผลึกทำให้แผ่น ผลึกร้อน การอบสามารถทำได้จำนวนหลายแผ่นพร้อมๆ กัน โดยแผ่นผลึกจะถูกเก็บไว้ในกล่อง

คาสเซ็ทพิเศษ และวิธีการให้ความร้อนแบบนี้แผ่นผลึกจะได้รับความร้อนจากผิวรอบนอกเข้าไป ด้านใน วิธีการนี้อาจทำให้ผิวหน้าของชั้นน้ำยาไวแสงได้รับความร้อนก่อน จึงอาจเกิดการแข็งตัว และป้องกันไม่ให้ความชื้นที่อยู่ด้านในออกมาภายนอกได้ซึ่งเป็นข้อเสีย และไม่เหมาะที่จะใช้สำหรับงานที่มีความละเอียดสูง สำหรับในสายการผลิตวงจรรวม ในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมอบแผ่นผลึกทีละแผ่น โดยเคลื่อนอยู่บนสายพาน ซึ่งถูกฉายด้วยรังสีอินฟราเรด วิธีการเช่นนี้ ฐานรองที่เป็นแผ่นผลึกซิลิคอนจะได้รับความร้อนก่อนเพราะซิลิคอนมีคุณสมบัติดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ดีกว่าชั้นของน้ำยาไวแสง ดังนั้นความร้อนจึงเริ่มจากฐานรองแผ่นผลึกซิลิคอน แล้วขึ้นไปสู่ชั้นน้ำยาไวแสง ซึ่งทำให้สามารถไล่ความชื้นออกมาได้โดยไม่เกิดปัญหา วิธีให้ความร้อน เช่นนี้ เรียกว่า “bottom up heating” นอกจากนี้อาจใช้วิธีการแบบแผ่นร้อน (hot plate) โดยนำแผ่นซิลิคอนไปวางบนแผ่นร้อน หรืออาจใช้คลื่น ไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนก็สามารถทำได้เช่นกัน

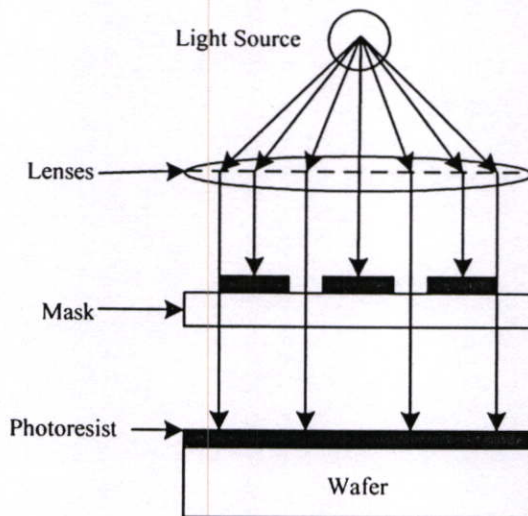
#### 4.2.4 การปรับซ็อนมาสก์ ( Mask Alignment )

การฉายแสงผ่านกระจกโฟโตมาสก์ซึ่งโดยปกติจะถูกวางทับ (contact) ลงไปบนแผ่นผลึกที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่กระจกโฟโตมาสก์ชั้นแรก หรือมาสก์ที่ 1 สามารถทำได้ โดยไม่ต้องมีการปรับซ็อนมาสก์ (mask alignment) ทั้งนี้เนื่องจาก ยังไม่ได้มีการสร้างส่วนหนึ่ง ส่วนใดของวงจรรวม บนแผ่นผลึกเลย แต่ในกรณีที่แผ่นผลึกนั้น ได้ผ่านการสร้างส่วนของวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไป จำเป็นที่จะต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่ง หรือบริเวณที่ถูกต้อง เพื่อให้ได้โครงสร้างของวงจรรวมตามที่ได้ออกแบบไว้

ดังนั้นการใช้กระจกโฟโตมาสก์ตั้งแต่มาสก์ 2 เป็นต้นไป ก่อนการฉายแสงจำเป็นจะต้องมีการปรับซ็อนมาสก์ เพื่อให้แบบลวดลายบนกระจกมาสก์ ซ็อนกับแบบลวดลายที่มีอยู่บนแผ่นผลึกอย่างถูกต้องในที่สุดของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี จะทำให้สามารถเปิดชั้นของออกไซด์ ที่ตำแหน่งที่ถูกต้อง โครงสร้างของวงจรรวมจึงเป็นไปตามที่ออกแบบ และถูกต้องอย่างไรก็ดี เนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นในการปรับซ็อนจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วย ซึ่งเรียกว่า “ตัวปรับซ็อนมาสก์” ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆ คือแผ่นผลึกจะถูกวางและติดไว้กับแท่นเลื่อน (x-y-z table) ซึ่งสามารถปรับให้เลื่อนในแนวนอน (x) แนวตั้งฉาก (y) และแนวสูง (z) ได้ การปรับเลื่อนนี้ทำได้ด้วยทั้ง แนว x, y, z นอกจากนี้ยังสามารถปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบ โดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ส่วนกระจกโฟโตมาสก์จะถูกยึดให้อยู่นิ่งเหนือผลึกเล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ ทำการสังเกตภาพลวดลายที่ปรากฏทั้งบนแผ่นผลึก และบนโฟโตมาสก์ พร้อมทั้งทำการปรับเลื่อนแผ่นผลึกทั้งแกน x, y และมุม  $\theta$  จนกระทั่งภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึกและบนโฟโตมาสก์ซ็อนกันลงตรงตำแหน่ง ที่ถูกต้อง จากนั้นจึงปรับให้แผ่นผลึกเลื่อนสูงขึ้นในแนวแกน z จนแนบสนิท กับกระจกโฟโตมาสก์ ในกรณีที่ภาพลวดลาย มีขนาดใหญ่พอที่จะสังเกตได้ การปรับซ็อนภาพนี้จะสามารถทำได้โดยสังเกตจากลวดลายของวงจรรวมโดยตรง แต่โดยทั่วไป ภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก

นอกจากนี้ยังมีจำนวนมากอีกด้วยจึงเป็นการยาก ที่จะทำการปรับซ็อน โดยสังเกตจากภาพ ลวดลายของวงจรรวม ในทางปฏิบัติ เพื่อให้การปรับซ็อนทำได้ง่าย จึงมีการใช้ภาพลวดลาย ซึ่ง ออกแบบขึ้นเพื่อใช้สำหรับการปรับซ็อนมาส์คโดยเฉพาะ และเรียกว่า “เครื่องหมายปรับซ็อน” ซึ่ง อาจจะเป็นภาพจัตุรัสในกล่องสี่เหลี่ยม (square in box), กากบาทในสี่เหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมใน กากบาท เช่น ภาพลวดลายบนแผ่นผลึกของ “เครื่องหมายปรับซ็อน” เป็นรูปจัตุรัส และภาพ ลวดลายบนกระจกมาส์ค เป็นรูปกล่องสี่เหลี่ยม เป็นต้น การปรับซ็อนทำได้โดยการปรับเลื่อน แผ่นผลึก บนแท่นให้อยู่ในตำแหน่งที่ได้ภาพ จัตุรัสเข้าไปซ็อนอยู่พอดี ภายในภาพกล่องสี่เหลี่ยม ในตำแหน่งนี้ภาพลวดลายของวงจรรวมบนแผ่นผลึก และบนกระจกโฟโตมาส์ค จะอยู่ตรง ตำแหน่งที่ถูกต้องทุกประการ ถ้าหากการปรับซ็อนตำแหน่งผิดพลาด โครงสร้างของวงจรรวมก็จะ ไม่ถูกต้อง และเกิดการเสียหายได้ขั้นตอนของการปรับซ็อนจึงเป็นเรื่องสำคัญมาก

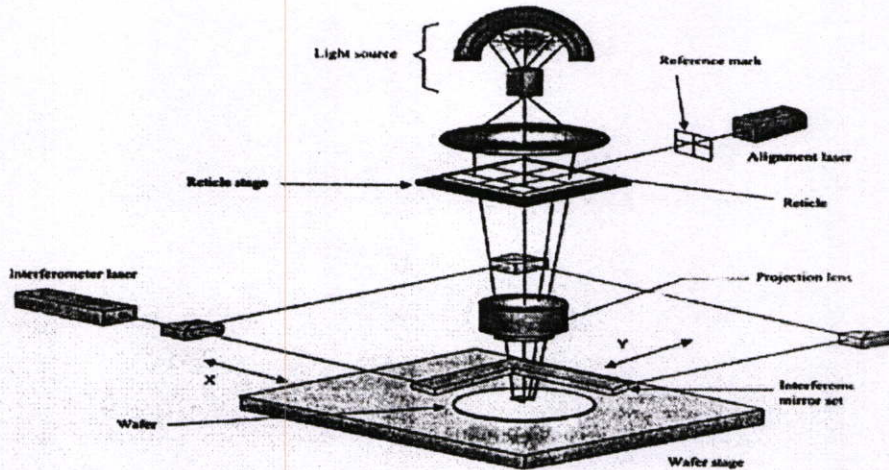
การพิมพ์ภาพด้วยการใช้กระจกโฟโตมาส์คมาวางทับลงไปบนแผ่นผลึกๆ ให้แนบสนิท แล้วฉายแสงซึ่งเรียกว่า วิธี contact Printing ดังกล่าวนี้ จะเห็นได้ว่าการสัมผัสกันระหว่างแผ่น ผลึก และกระจกโฟโตมาส์ค ซึ่งอาจทำให้เกิดรอยขีดขูด เกิดสิ่งสกปรก หรือความเสียหายต่าง ๆ ได้ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีการใช้วิธีพิมพ์แบบอื่น ๆ เช่น วิธี proximity printing หรือ วิธี projection printing ดังแสดงรูปที่ 4.2 ซึ่งกระจกโฟโตมาส์คจะไม่สัมผัสกับผิวหน้าของแผ่นผลึก เลย จึงช่วยลดความเสียหายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 4.2 กระบวนการพิมพ์ภาพโดยวิธี Projection Printing

สำหรับวิธีการ projection printing อาจทำได้ 2 แบบคือ แบบ whole-substrate projection printing ซึ่งเป็นการพิมพ์ ภาพวงจรรวมลงบนแผ่นผลึก ทั้งหมดครั้งเดียวและแบบ step and repeat projection ซึ่งเป็นการพิมพ์ภาพวงจรรวมทีละภาพๆ ลงบนแผ่นผลึกดังแสดงรูปที่ 4.3 ซึ่งการพิมพ์

วิธี projection printing นี้ได้รับความนิยมมากในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวมแต่อุปกรณ์ที่ใช้จะต้องมีความละเอียดสูงมากราคาของเครื่องค่อนข้างสูง

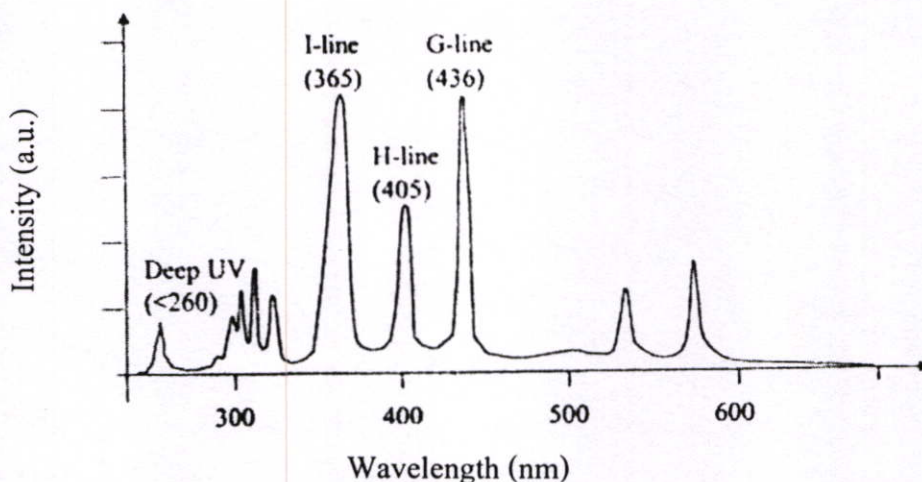


รูปที่ 4.3 กระบวนการพิมพ์ภาพ โดยวิธี Step and Repeat Projection

#### 4.2.5 การฉายแสง (Exposure)

เมื่อทำการปรับซ็อนภาพระหว่างกระจกโฟโต้มาส์ก และแผ่นฟิล์มเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือ การฉายแสง ผ่านกระจกโฟโต้มาส์ก เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี-แสงขึ้นที่ชั้นน้ำยาไวแสง ปกติน้ำยาไวแสงที่ใช้ในเทคนิคโฟโต้ลิโธกราฟี สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวม จะมีความไวต่อแสงที่มีความยาวคลื่น  $\lambda$  ในช่วง 300-500 นาโนเมตร ซึ่งก็คือ แสงที่เรามองเห็นเป็นสีม่วง และสีน้ำเงินนั่นเอง ดังนั้นในห้องปฏิบัติการ เทคนิคโฟโต้ลิโธกราฟีจึงสามารถใช้แสงสีเหลืองได้ เพราะแสงสีเหลืองมีความยาวคลื่นมากกว่า 500 nm ซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสง แต่ถ้าเป็นฟิล์มถ่ายรูปจะต้องใช้แสงในห้องที่มีสีแดงเท่านั้น แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้มาจากหลอดไอปรอท (mercury vapor lamp) ซึ่งหลอดนี้จะให้เส้นสเปกตรัมที่มีความเข้มสูง ที่ความยาวคลื่นราว 310, 365, 405 และ 440 นาโนเมตร ตามลำดับดังแสดงรูปที่ 4.4 และจากการศึกษาพบว่า น้ำยาไวแสงชนิดลบ จะมีความไวสูงสุดใกล้กับเส้นสเปกตรัม 405 นาโนเมตร และน้ำยาไวแสงชนิดบวก จะมีความไวสูงสุด ใกล้กับเส้นสเปกตรัม 365 นาโนเมตร

จากสเปกตรัมของแสง ความยาวคลื่นประมาณ 400 nm ถูกเรียกว่า Near Ultraviolet Wave Lengths หรือ Near UV. ซึ่งเป็นแสง สำหรับเทคนิคโฟโต้ลิโธกราฟีโดยทั่ว ๆ ไป สำหรับความยาวคลื่นที่ต่ำกว่านี้ เราเรียกว่า Far Ultraviolet Wave Lengths หรือ Far UV. จากการศึกษพบว่า การพิมพ์ภาพที่มีขนาดเล็กๆ จำเป็นต้องใช้แสง ที่มีความยาวคลื่นสั้นๆ เช่นขนาดราว 2 ไมโครเมตร ต้องใช้คลื่น Far UV. ดังนั้นในวงจรรวมระดับ VLSI ที่มีขนาดอุปกรณ์เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จึงต้องใช้แสงประเภท Far UV. ซึ่งมีความยาวคลื่นราว 100-200 nm



รูปที่ 4.4 แสงสเปกตรัมของหลอดเมอร์คิวรี

ยิ่งไปกว่านี้ยังสามารถใช้คลื่นรังสีเอ็กซ์ และลำอิเล็กตรอนมาแทนแสงได้ด้วย ทำให้สามารถพิมพ์ภาพลวดลายวงจรรวมที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ ซึ่งเทคนิคนี้ถูกเรียกว่า “เอ็กซ์เรย์ลิโธกราฟี” (X-Ray Photolithography) และ Electron-beam Lithography ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม น้ำยาไวแสงที่จะใช้จะต้องแตกต่างจากธรรมดา เพราะรังสีเอ็กซ์ และลำอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงกว่าแสง Near UV. ที่ใช้กับน้ำยาไวแสงปกติ

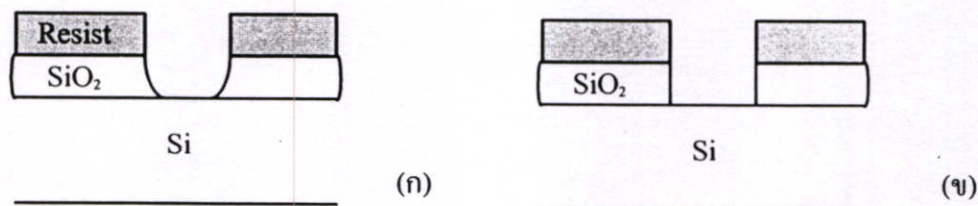
#### 4.2.6 การล้างน้ำยาไวแสง (Resist Development)

ขั้นตอนนี้เป็นการใช้น้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) ละลาย หรือล้างน้ำยาไวแสง ที่ผ่านการฉายแสงมาแล้ว ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดลบ ส่วนที่ไม่ถูกแสงจะถูกละลายออก แต่ถ้ากรณีน้ำยาไวแสงชนิดบวก ส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลายออกไป การล้างน้ำยาไวแสงนี้ถ้าเป็นกรณีน้ำยาไวแสงชนิดลบ จะใช้วิธีการพื้นฐานคือ นำแผ่นผลึกลงไปหมุนบนสปินเนอร์ (spinner) คล้ายกับการเคลือบน้ำยาไวแสง โดยขณะที่แผ่นผลึกกำลังหมุน น้ำยาล้างจะถูกฉีดพ่นลงไปบนแผ่นผลึก น้ำยาไวแสงที่ถูกละลายก็จะถูกแรงเหวี่ยงกระจายออกไปรอบๆ จากนั้นล้างแผ่นผลึกให้สะอาดด้วยสารละลายอื่นๆ แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ในกรณีของน้ำยาไวแสงชนิดบวก อาจทำได้ครั้งละหลายๆ แผ่นพร้อมกัน โดยจุ่มลงในน้ำยาล้าง หรืออาจใช้วิธีการฉีดพ่นน้ำยาล้าง คล้ายกับวิธีการล้างน้ำยาไวแสงชนิดลบ

#### 4.2.7 การเอตซิงค์ (Etching)

ขั้นตอนนี้เป็นการสกัด หรือละลาย ชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ หรือวัสดุอื่นๆ ด้วยสารเคมีที่เป็น สารตัวสกัด หรือเอตเชนท์ โดยที่แผ่นผลึก ที่ผ่านการล้างน้ำยาไวแสง (development) แล้ว น้ำยาไวแสงจะเหลือตกค้าง และปกคลุมอยู่บนผิว ของชั้นซิลิคอนได

ออกไซด์ และบางส่วนก็ถูกละลายออกไป ทำให้ชั้นออกไซด์ บริเวณที่ไม่มีสารไวแสงเหลืออยู่ ถูกทำปฏิกิริยาเคมีกับสารตัวสกัด เช่น กรดกัดแก้ว (HF) ก่อนการเอตซิงค์ หรือก็คือ ภายหลังจากสร้างน้ำยาไวแสง แผ่นผลึกจะถูกนำไปอบ (post bake หรือ hard bake) เพื่อใช้ชั้นน้ำยาไวแสงแห้งสนิท และบีดติดแน่นกับผิวของออกไซด์ วิธีการการสกัดชั้นสาร หรือชั้นออกไซด์โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีของสารตัวสกัด ที่เป็นสารละลายเคมีนี้ ถูกเรียกว่า “wet chemical etching” หรือ “wet etching” หรือ การเอตซิงค์เปียก ดังแสดงรูปที่ 4.5 (ข)



รูปที่ 4.5 ผลของการเอตซิงค์ (ก) การเอตซิงค์เปียก และ (ข) การเอตซิงค์แห้ง

นอกจากนี้การสกัด หรือเอตซิงค์ สามารถทำได้โดยใช้ปฏิกิริยาของพลาสมา (plasma) วิธีการนี้ถูกเรียกว่า “พลาสมาเอตซิงค์” หรือ “plasma etching” ซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่า dry etching หรือ “การเอตซิงค์แห้ง” การเอตซิงค์แบบเปียก จะทำให้เกิดมีการละลายของชั้นสารออกไปในทุกๆ ด้านรวมทั้ง ทางด้านข้างด้วย ทำให้บริเวณขอบของชั้นสาร ถูกสกัดออกไป การเอตซิงค์ในลักษณะนี้ถูกเรียกว่า “ไอโซโทรปิกเอตซิงค์” หรือ “Isotropic-type” ส่วนการเอตซิงค์แบบแห้ง หรือ plasma etching จะได้ผลการเอตซิงค์แบบ “แอนไอโซโทรปิกเอตซิงค์” หรือ anisotropic-type ซึ่งจะทำได้ลักษณะของลวดลายที่คมชัดกว่า การเอตซิงค์แบบเปียก ดังแสดงรูปที่ 4.5 (ก) และภาพลวดลายไม่ผิดเพี้ยนจากคั่นแบบ ซึ่งวิธีการนี้ ถูกนำมาใช้กับลวดลายที่มีขนาดเป็นซับไมโครเมตร โดยที่การเอตซิงค์แบบเปียกไม่สามารถนำมาใช้ได้

อัตราการเอตซิงค์แบบเปียก จะขึ้นอยู่กับชนิด และความเข้มข้นของสารตัวสกัด และอุณหภูมิที่ใช้ในการเอตซิงค์ สารละลายซึ่งเป็นสารตัวสกัด ชั้นของออกไซด์ได้แก่กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ซึ่งจะมีแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ( $\text{NH}_4\text{F}$ ) ผสมอยู่เพื่อควบคุมปฏิกิริยาเคมีให้สม่ำเสมอ อัตราการสกัด (etching rate) ประมาณ  $1000 \text{ \AA}/\text{min}$  ที่อุณหภูมิห้องหลังจากทำการเอตซิงค์แล้ว ชั้นของน้ำยาไวแสงจะถูกลอกออก ด้วยการนำไปจุ่มในสารละลายที่ใช้สำหรับการลอกฟิล์ม หรือดัมในกรดบางชนิด เช่น กรดน้ำยาไวแสงชนิดลบใช้ดัมในกรดซัลฟูริกเข้มข้น และชนิดบวกใช้จุ่มล้างในสารอะซีโตน (acetone) สำหรับกรณีของซับไมครอน นิยมใช้วิธีการของพลาสมาเอตซิงค์ ซึ่งจะทำได้ผิวหน้าที่สะอาด และเรียบร้อย ไม่มีชั้นของน้ำยาไวแสงหลงเหลือหรือติดค้างอยู่เลย

### 4.3 กระบวนการแพร่สารเจือ

เทคนิคของการเติมสารเจือ ในงานของการสร้างวงจรรวม หรือสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ในปัจจุบันนี้ กระทำได้หลายวิธี ซึ่งทั้งนี้ย่อมแล้วแต่ความเหมาะสม ในตอนนี้จะได้อธิบายถึง เทคนิคการแพร่สารเจือซึ่งเป็นที่นิยมกันมาก และนับว่าง่ายต่อการควบคุม การกระจายของสารเจือ และสะดวกในการปฏิบัติอีกด้วย

#### 4.3.1 การแพร่สารเจือชนิดพี

ธาตุที่สามารถนำมาใช้เป็นสารเจือชนิด p ในงานสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซิลิคอน ได้แก่ แกลเลียม (Gallium) อะลูมิเนียม (Aluminium) โบรอน (Boron) และอินเดียม (Indium) แต่ในทางปฏิบัติจริงๆ และมีความจำเป็นอย่างขั้วที่จะต้องเลือกธาตุสารเจืออย่างพิถีพิถัน หากใช้ว่าจะใช้ได้ในทุกกรณี ตัวอย่างเช่น จะไม่ให้ธาตุแกลเลียมเป็นสารเจือชนิด p เนื่องจากแกลเลียมสามารถที่จะแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอนได้ออกไซด์ได้ดี หรือก็คือ แกลเลียมมีค่า สัมประสิทธิ์การแพร่ใน ออกไซด์ได้สูงนั่นเอง ทำให้การใช้ชั้นของออกไซด์ป้องกันผิวซิลิคอนไม่ได้ผล นอกจากนี้แล้ว การเลือกธาตุใดเป็นสารเจือยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ อีกเช่น อะตอมของโบรอนทำให้เกิดโฮลได้ดีกว่าอะตอมของอินเดียม เนื่องจากระดับพลังงานผู้รับของโบรอนอยู่ที่ 0.01eV ส่วนของอินเดียมอยู่ที่ระดับ 0.16 eV และอะลูมิเนียมก็มีข้อเสียคือ สามารถทำปฏิกิริยาเข้าร่วมกับ ออกซิเจนได้ไวมากกลายเป็นฉนวนไฟฟ้าด้วยเหตุผลต่างๆ ดังกล่าวมานี้ จึงทำให้โบรอนเป็นธาตุ ที่นิยมนำมาใช้เป็นสารเจือชนิด P กันมาก และ โบรอนก็มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่สูงพอประมาณ  $10^{-16} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ที่  $1150^\circ \text{ C}$  ทำให้สามารถควบคุมการแพร่ได้โดยสะดวก

เทคนิคการแพร่สารเจือโดยใช้โบรอนอาจจะกระทำได้ 3 แบบคือ อะตอมของโบรอนสามารถนำมาได้จากสารประกอบ 3 ชนิดในสถานะของแข็งคือโบรอนไตรออกไซด์ ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) หรือในสถานะของเหลวคือ โบรอนไตรโบรไมด์ ( $\text{BBr}_3$ ) ในสถานะของก๊าซคือ โบรอนไตรคลอไรด์ ( $\text{BCl}_3$ ) ซึ่งไม่ว่าจะเป็นสารประกอบชนิดใดก็ตาม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวของซิลิคอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างโบรอนไตรออกไซด์ และซิลิคอนทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมของโบรอนออกมาจาก  $\text{B}_2\text{O}_3$  ที่ผิวของซิลิคอน โดยเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้คือ



จากนั้น โบรอนจึงจะแพร่เข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอน แต่ในงานอุตสาหกรรมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนิยมใช้สารประกอบ โบรอนไนไตรด์ (BN) เป็นต้นกำเนิดของโบรอน เนื่องจากมีความสะดวกในการแพร่มากที่สุด โดยที่สารประกอบ BN เป็นของแข็งจะทำให้อยู่ในลักษณะเป็นแผ่นบางๆ คล้ายแผ่นผลึกซิลิคอนก่อนทำการแพร่แผ่น BN จะถูกทำให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน

ได้ คือจะถูกนำไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ที่อุณหภูมิ  $900^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้บริเวณผิวของแผ่น BN กลายเป็นโบรอนไดรอกไซด์ ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) เสียก่อนซึ่งเรียกว่าการ Activate จากนั้นจึงนำแผ่นผลึกซิลิคอนมาวางใกล้ๆ กับแผ่น BN นี้แล้วจึงทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว  $1100^{\circ}\text{C}$  (ในบรรยากาศของไนโตรเจน)

การแพร่โบรอนที่นิยมมากก็คือ กระทำสองขั้นตอนดังที่เขากล่าวมาแล้ว โดยจะทำการชั้น deposit ที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลา 30 นาทีในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยอาจเป็นอาร์กอน 99% หรือไนโตรเจน 99% และก๊าซออกซิเจน 1% ต่อจากนั้นจึงทำการแพร่ขั้นที่สองต่อไปคือ drive in ในบรรยากาศของออกซิเจนที่อุณหภูมิ  $1100^{\circ}\text{C}$  ในช่วงเวลาหนึ่ง โบรอนจะแพร่เข้าไปในซิลิคอนได้ลึกตามที่ต้องการ ในกรณีที่ใช้  $\text{BBr}_3$  เราจะใช้ไนโตรเจนผ่านเข้าไปในสารละลาย  $\text{BBr}_3$  จากนั้นไอของ  $\text{BBr}_3$  จึงจะผ่านเข้าไปในท่อควอทซ์ หรือในกรณีที่ใช้ก๊าซ  $\text{BCl}_3$  ก็สามารถผ่านเข้าไปในท่อควอทซ์ได้โดยตรง

#### 4.3.2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น

ธาตุที่สามารถนำมาใช้เป็นสารเจือชนิด n ได้แก่ ฟอสฟอรัส (Phosphorus), พลวง (Antimony) และสารหนู (Arsenic) การจะเลือกธาตุที่จะนำไปเป็นสารเจือทำได้โดยไม่จำกัด ซึ่งต่างจากกรณี สารเจือชนิด p กล่าวคือ ธาตุเหล่านี้ใช้งานได้ดี ในแต่ละลำดับชั้น ตัวอย่างเช่น พลวงและสารหนู ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำมักใช้เป็นสารเจือชนิด n ในการแพร่เพื่อสร้างชั้นฝัง (buried layer) n+ ซึ่งเป็นการแพร่ครั้งแรกในงานสร้างวงจรรวม ส่วนการแพร่อื่นๆ โดยทั่วไปนิยมใช้ ฟอสฟอรัสเป็นสารเจือชนิด n ทั้งนี้เพราะค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตัวของฟอสฟอรัสสูงกว่า พลวงและสารหนู ดังนั้นจึงนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อความประหยัด คือสามารถแพร่ได้เร็ว ในช่วงเวลาอันสั้น การแพร่ฟอสฟอรัสสามารถกระทำให้ 3 ลักษณะเช่นเดียวกันคือ ฟอสฟอรัสอาจนำมาได้จากสารประกอบ 3 ชนิด เช่นในสถานะของแข็งได้แก่ ฟอสฟอรัสเพนตอิกไซด์ ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) หรือในสถานะของเหลวคือ ฟอสฟอรัสออกซิคลอไรด์ ( $\text{POCl}_3$ ) หรือในสถานะก๊าซคือ ก๊าซฟอสฟีน ( $\text{PH}_3$ ) ซึ่งเป็นก๊าซพิษ และอาจจะเปิดได้ปฏิกิริยาซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวของซิลิคอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างฟอสฟอรัสเพนตอิกไซด์ ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) และซิลิคอน ทำให้เกิดการแยกตัวของฟอสฟอรัสออกจาก  $\text{P}_2\text{O}_5$  ที่ผิวของซิลิคอน ซึ่งเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้

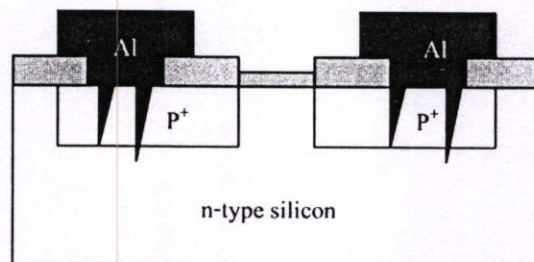


จากนั้น ฟอสฟอรัสจึงจะแพร่เข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอน ในปัจจุบันนิยมใช้  $\text{POCl}_3$  เป็นต้นกำเนิดของสารเจือฟอสฟอรัส โดยทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว  $1200^{\circ}\text{C}$  ในช่วงเวลาตามต้องการในบรรยากาศของไนโตรเจน

#### 4.4 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization Process)

กระบวนการเมทัลไลเซชัน คือ กระบวนการสร้างชั้นของโลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับขั้วไฟฟ้า หรือแถบตัวนำเชื่อมต่อภายใน โลหะที่ถูกนำมาใช้ในการเป็นขั้วไฟฟ้า เช่น

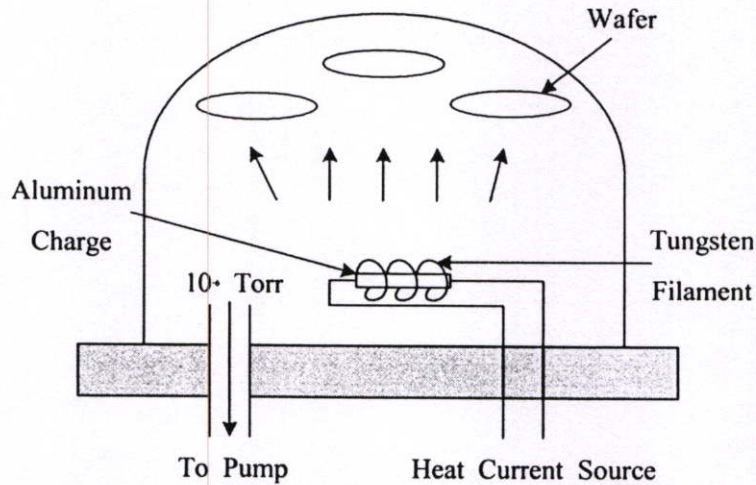
1. อะลูมิเนียม (Al) เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุด จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งเป็นขั้วไฟฟ้าและเป็นตัวนำเชื่อมต่อภายใน อย่างไรก็ตามในกรณีของอุปกรณ์ประเภทรอยต่อตื้น (shallowed junction) เช่น MOSFET หรือ MOS IC จะมีปัญหาของ Al Spike เกิดขึ้นที่บริเวณขั้วโลหะทำให้รอยต่อ พี-เอ็นเสียหายจึงต้องมีการแก้ปัญหาติดตามมาดังแสดงรูปที่ 4.6
2. ทอง (Au) มีการนำมาใช้ในบางกรณีแต่มีราคาแพง และเนื่องจากอะตอม ทองคำเป็นอะตอมสารเจือระดับลึก (deep level impurity) จึงทำให้มีปัญหาการจับพาหะ (trapping) ทองจึงไม่เป็นที่นิยมโดยทั่วไป
3. โพลีซิลิคอนที่ถูกเติมอะตอมสารเจือทำให้มีความนำไฟฟ้าสูงคล้ายโลหะและ



รูปที่ 4.6 อุปกรณ์ที่เกิด Al Spike

สามารถนำมาใช้เป็นตัวนำเชื่อมต่อภายในได้เช่นในงาน VLSI และ 4. Diffused layer เป็นชั้นของสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมอะตอมสารเจืออย่างเข้มข้นทำให้มีความต้านทานต่ำ สามารถใช้แทนโลหะได้ นิยมใช้ทำส่วน Cross Over

กระบวนการเคลือบอะลูมิเนียมโดยทำให้อะลูมิเนียมกลายเป็นไอด้วยความร้อน และทำให้อะลูมิเนียมไปเกาะอยู่บนผิวหน้าของแผ่นเรียกว่ากระบวนการระเหยในสุญญากาศ (evaporation) ซึ่งจะมีบทบาทสำคัญในกระบวนการเมทัลไลเซชันในการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ การเปลี่ยนอะลูมิเนียมให้กลายเป็นไอภายใต้ความดันต่ำโดยระบบต้องการความดันประมาณ  $10^{-6}$  Torr เป็นการทำให้ออกซิเจนและความชื้นเหลือน้อยที่สุด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะเป็นผลให้อะลูมิเนียมมีความต้านทานสูงได้ กระบวนการระเหยในสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กระบวนการระเหยในสุญญากาศ ( evaporation )

เส้นลวดถูกทำให้ร้อนจนละลายตลอดขณะที่ระบอบอยู่ภายใต้ความดันต่ำ หลังจากนั้น อุณหภูมิที่อะลูมิเนียมจะระเหยแพร่ไปเคลือบบนแผ่นผลึก ทำให้มีชั้นอะลูมิเนียมบางๆเคลือบ บนแผ่นผลึก การควบคุมความหนาของโลหะนั้นจะมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าซึ่งควบคุม โดยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าทำให้อัตราการเคลือบแผ่น (deposition rate) สูงขึ้นตามไปด้วยแต่ว่าสิ่งสำคัญของระบบนี้คือการยากในการควบคุมความ หนาของฟิล์มซึ่งในกระบวนการสร้าง VLSI และ ULSI จะไม่ใช่กระบวนการนี้เนื่องจาก กระบวนการระเหยในสุญญากาศนี้จะทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_T$ ) มอสเฟตสูงขึ้นและทำให้วงจร รวมถูกลดความน่าเชื่อถือโดยที่ระบบนี้ใช้กระแสไฟฟ้าสูงมากประมาณ 10 A อาจก่อให้เกิด อันตรายได้ โลหะที่ทำการสร้างบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำนั้นจะมีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์ นั้นๆ ซึ่งคุณสมบัติของโลหะที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. ค่าความต้านทาน (contact resistance : $R_c$ ) มีค่าต่ำหรือเป็นคอนแทกที่ดีและมีสภาพ เป็น โอห์มมิกคอนแทก
2. ความน่าเชื่อถือ (reliability) เช่น ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารอื่นๆ ได้ง่าย คุณสมบัติ จึงไม่เปลี่ยนแปลงนั่นคือโลหะมีอายุการใช้งานนาน
3. ต้องสามารถทำการสกัด (photo etching) ได้ และได้ลวดลายที่คมชัด และละเอียด
4. ต้องยึดติดกับผิวของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) ได้ดีไม่ลอกง่าย รวมทั้งต่อเชื่อมกับ ลวดโลหะจากภายนอกได้ดี
5. มีราคาถูก และสามารถสร้างได้โดยง่าย

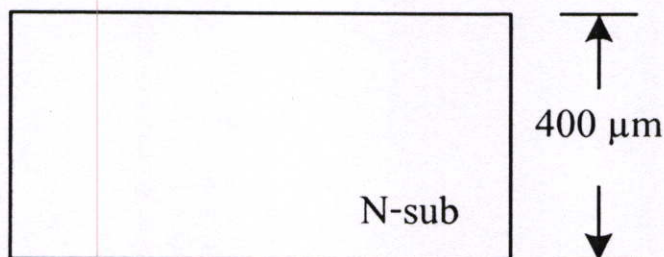
#### 4.5 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา

##### การเตรียมแผ่นซิลิคอน

ในการสร้างไบโพลาร์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา ใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (100) ค่า Resistivity ได้ 2-4  $\Omega$ -cm ความหนาของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นมีความหนาประมาณ 400  $\mu$ m

##### การทำความสะอาดผิวของซิลิคอนครั้งแรก

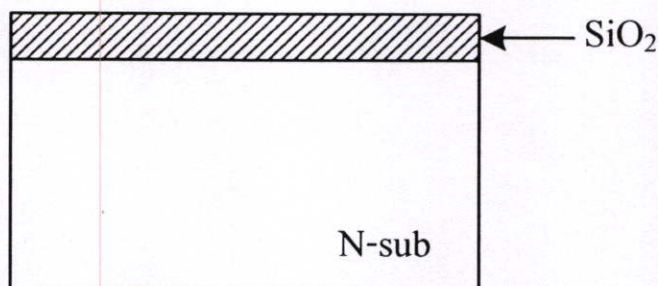
- ต้มในกรด  $\text{HNO}_3$  10 นาที
- ต้มในน้ำบรูสิทรีแก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในน้ำบรูสิทรีแก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบรูสิทรี
- เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$



รูปที่ 4.8 แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น

##### กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

นำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วไปทำการสร้างชั้น  $\text{SiO}_2$  โดยวิธี dry oxidation ที่อุณหภูมิ 1100  $^{\circ}\text{C}$  ในเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นใช้วิธี wet oxidation ที่อุณหภูมิ 1100  $^{\circ}\text{C}$  ในเวลา 1.5 ชั่วโมงและใช้ dry oxidation เป็นครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 1100  $^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลา 0.5 ชั่วโมง ได้ออกไซด์เคลือบอยู่บนแผ่นซิลิคอนได้ความหนาซิลิคอนไดออกไซด์ ประมาณ 5000  $\text{\AA}$



รูปที่ 4.9 ซิลิคอนไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิคอน

### กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ 1

โดยนำแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการสร้างชั้น  $\text{SiO}_2$  แล้วไปทำการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ 1350) จากนั้นนำไปฉายแสง UV โดยผ่าน โฟโตมาสก์ซึ่งเป็นกระจกแผ่นที่ 1 (base mask) และทำการล้างน้ำยาไวแสง (develop) ได้ดังรูป

อบแผ่นไล่ความชื้นที่  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  30 นาที  
เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ 1350)

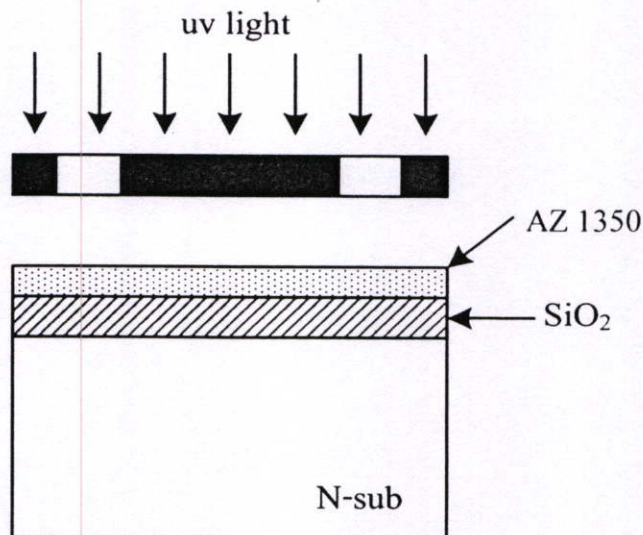
อบฟิล์มที่  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  15 นาที (prebake)

การปรับซ็อนมาสก์และการฉายแสง

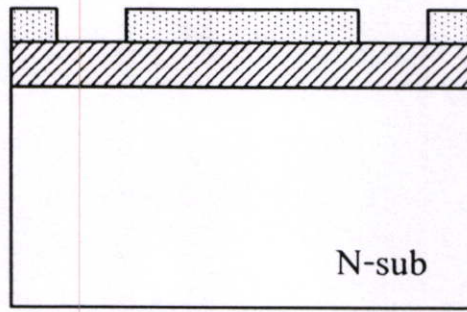
กระบวนการล้างน้ำยาไวแสงโดย

- จุ่มลงใน AZ แก้วที่หนึ่ง 10 วินาที
- จุ่มลงใน AZ แก้วที่สอง 10 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- จุ่มเป่าให้แห้งด้วย  $\text{N}_2$

อบฟิล์มที่  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  10 นาที (post bake)



รูปที่ 4.10 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 1



รูปที่ 4.11 ผลการ develop ภายหลังจากการฉายแสง

#### กระบวนการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (Oxide Etching)

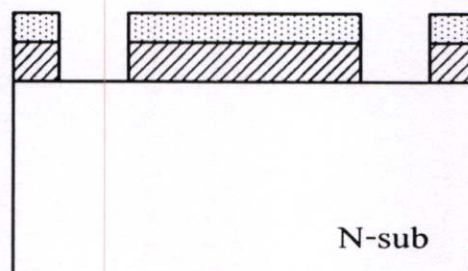
ทำการสกัดชั้น  $\text{SiO}_2$  โดยจุ่มในสารละลาย Buffer ซึ่งมีอัตราการกัด  $1000 \text{ \AA}/\text{min}$  แล้วจุ่มในน้ำบริสุทธิ์จึงเป่าให้แห้งจากนั้นนำไปลอกฟิล์มออก

การใช้สารละลายสกัด ชั้นออกไซด์ (oxide etching)

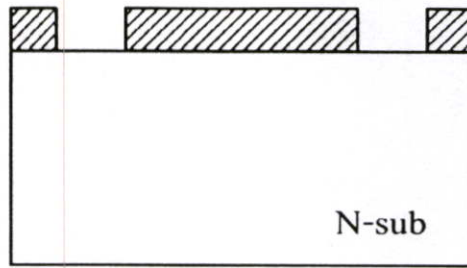
- จุ่มในน้ำสารละลาย buffer
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $\text{N}_2$

#### กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง

- จุ่มใน Asetone แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มใน Asetone แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $\text{N}_2$



รูปที่ 4.12 ผลการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.13 กระบวนการลอกน้ำยาไวแสง

#### กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส

เมื่อทำการสกัดชั้น  $\text{SiO}_2$  แล้วจะทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสส่วน บริเวณที่มี  $\text{SiO}_2$  กั้นอยู่ ฟอสฟอรัสไม่สามารถแพร่เข้าไปได้

#### กระบวนการ Pre-deposition

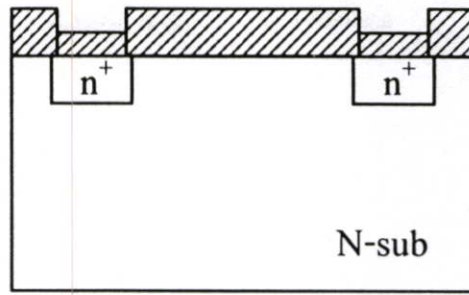
- Phosphorus deposition Temp  $1000^\circ\text{C}$
- เคลือบแผ่นด้วย ฟอสฟอรัสชนิดเหลว
- อบแผ่น 10 นาที ที่  $90^\circ\text{C}$
- deposit ด้วย  $\text{N}_2$  1000 cc/min 15 นาที

#### ลอกชั้น Phosphorus glass

- จุ่มในสารละลาย HF 5%
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย

#### กระบวนการ drive in

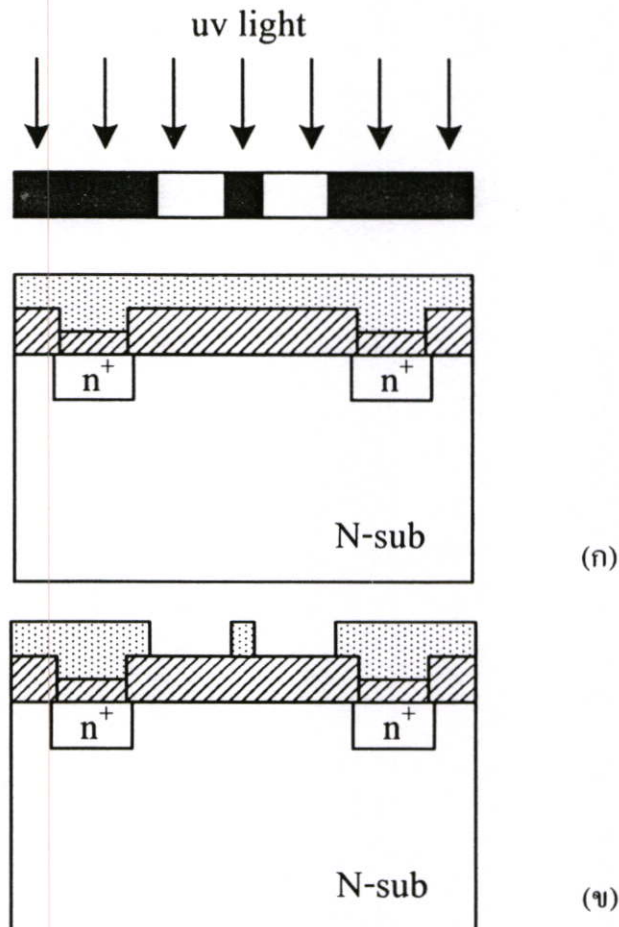
- Boron drive in Temp  $1100^\circ\text{C}$
- Dry ด้วย  $\text{O}_2$  1200 cc/min 20 นาที
- Wet ด้วย  $\text{O}_2$  1000 cc/min 20 นาที
- Dry ด้วย  $\text{O}_2$  1200 cc/min 20 นาที



รูปที่ 4.14 กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส

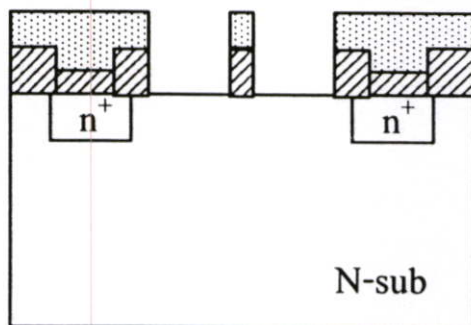
### กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาส์ค2

นำชิ้นงานไปเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก จากนั้นนำชิ้นงานไปฉายแสง UV โดยผ่านโฟโตมาส์คซึ่งเป็นกระจกแผ่นที่ 2 (Emitter, Collector Mask) แล้วทำการ develop

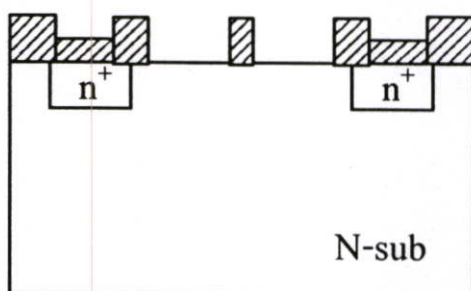


รูปที่ 4.15 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (ก) การฉายแสงและ(ข) การ develop

### กระบวนการสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (Oxide Etching)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.16 (ก) การสกัดชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ และ (ข) ภายหลังจากการลอกฟิล์ม

### กระบวนการแพร่สารเจือโบรอน

หลังจากลอกชั้น  $\text{SiO}_2$  แล้ว จะทำการแพร่สารเจือ โบรอน เพื่อสร้างส่วนอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์

กระบวนการ Pre-deposition

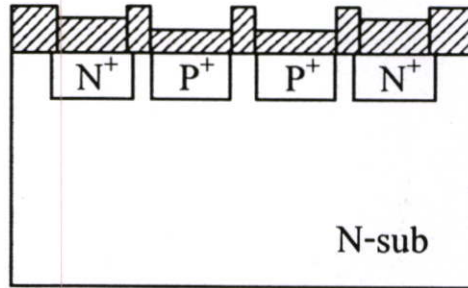
- Boron deposition Temp  $1000^\circ\text{C}$
- เคลือบแผ่นด้วยโบรอนชนิดเหลว
- อบแผ่น 10 นาที ที่  $130^\circ\text{C}$
- deposit ด้วย  $\text{N}_2$  1000 cc/min 15 นาที
- สร้าง Boron glass ด้วย  $\text{O}_2$  1200 cc/min 5 นาที

ลอกชั้น Boron glass

- จุ่มในสารละลาย HF 5%
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $\text{N}_2$

กระบวนการ drive in

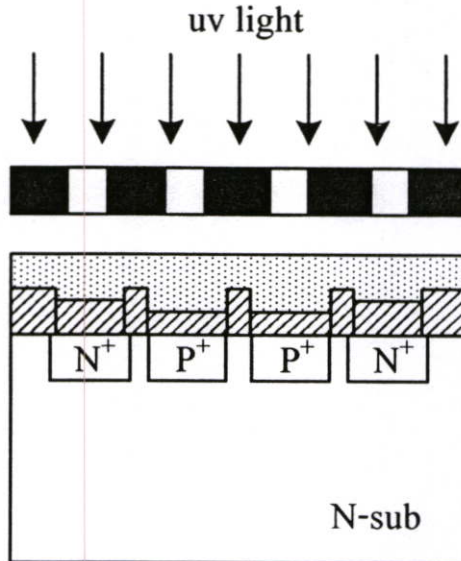
- Phosphorus drive in Temp 1100 °C
- dry ด้วย O<sub>2</sub> 1200 cc/min 30 นาที
- wet ด้วย O<sub>2</sub> 1000 cc/min 30 นาที
- dry ด้วย O<sub>2</sub> 1200 cc/min 30 นาที



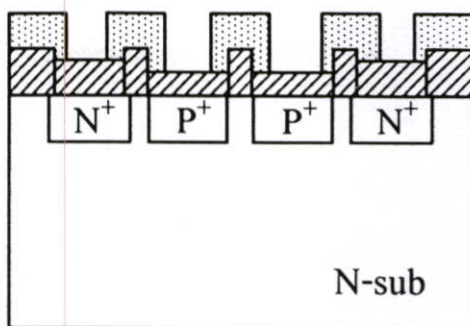
รูปที่ 4.17 กระบวนการแพร่สารเจือโบรอนได้ส่วนอิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์

กระบวนการโฟโตลิโกราฟีมาสก์ 3

ทำการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ จากนั้นนำไปฉายแสง UV โดยผ่านโฟโตมาสก์ 3 (contact mask)

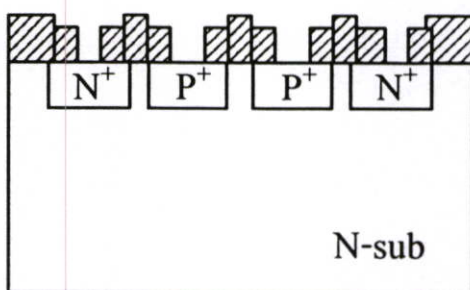


รูปที่ 4.18 กระบวนการโฟโตลิโกราฟีมาสก์ที่ 3



รูปที่ 4.19 กระบวนการลอกน้ำยาไวแสง

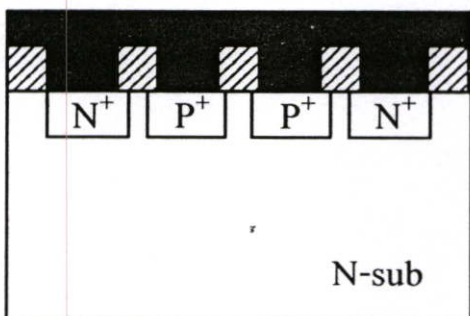
กระบวนการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (oxide etching)



รูปที่ 4.20 การสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อสร้างช่อง contact

กระบวนการ Metalization

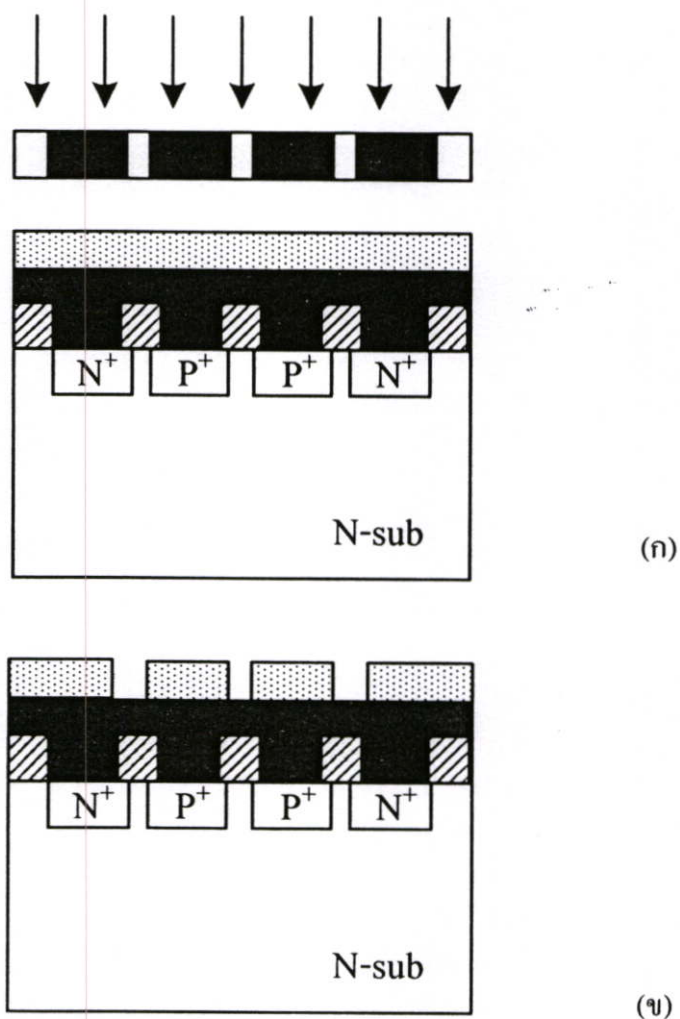
กระบวนการเคลือบชั้นอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการระเหยในสุญญากาศ evaporation ที่ความดัน  $2.5 \times 10^{-6}$  Torr ในเวลา 5 ชั่วโมง



รูปที่ 4.21 กระบวนการเคลือบชั้นอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการระเหยในสุญญากาศ

#### กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาส์ค 4

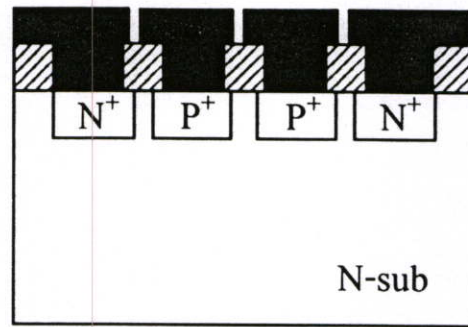
เมื่อทำการเคลือบอะลูมิเนียมแล้ว ทำการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ) แล้วนำไปฉายแสง UV แล้วนำไปทำการล้างน้ำยาไวแสง (develop)



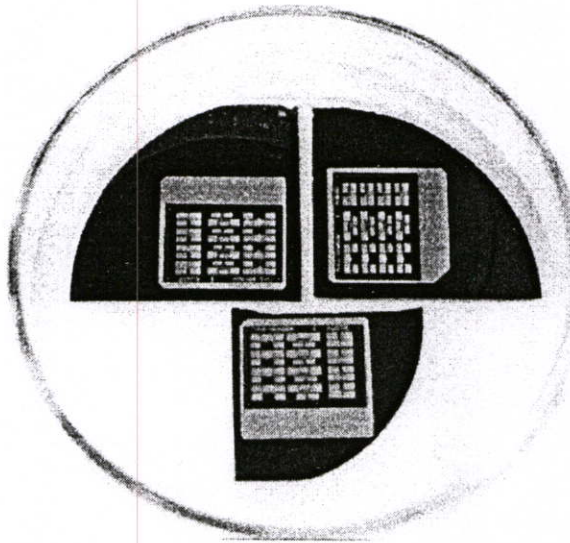
รูปที่ 4.22 กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีมาส์คที่ 4 (ก) การฉายแสงผ่านมาส์ค และ (ข) ภายหลังจากการล้างน้ำยาไวแสง (develop)

กระบวนการสกัดชั้นโลหะ (Al-Etching) และซินเตอร์

เมื่อทำการสกัดชั้นอะลูมิเนียม โดยการจุ่มสารละลายที่อุณหภูมิประมาณ  $40^{\circ}\text{C}$  ทำการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}\text{C}$  ในเวลา 10 นาที



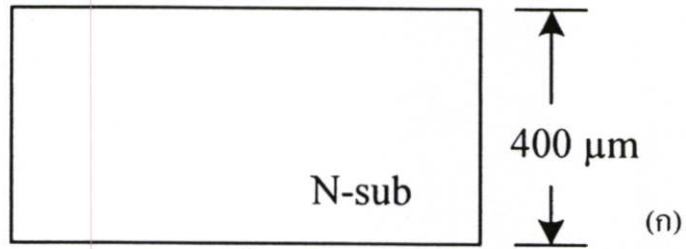
รูปที่ 4.23 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์



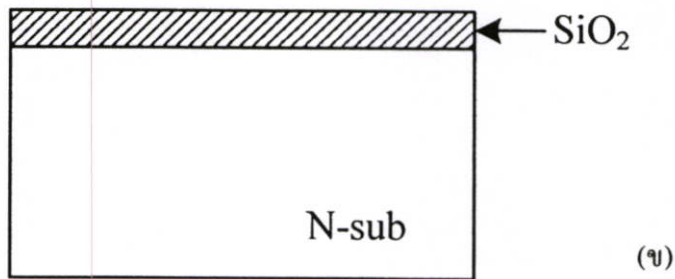
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาที่เสร็จสมบูรณ์

#### 4.6 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

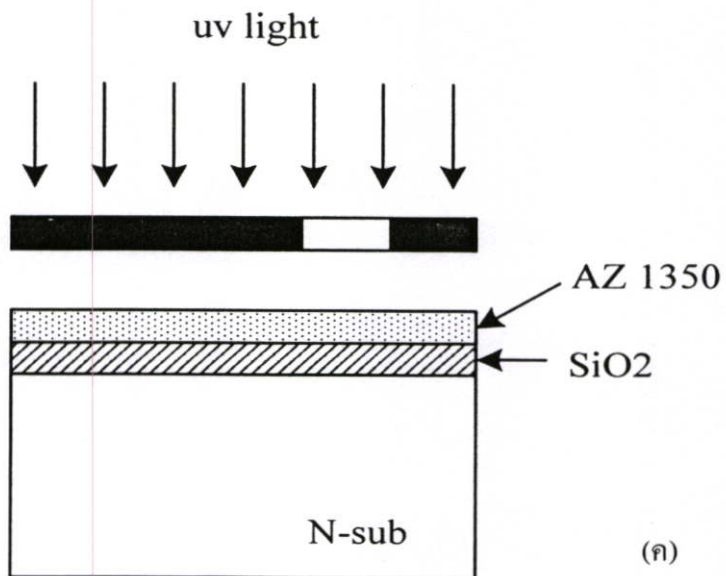
การตรวจสอบและทำความสะอาดแผ่นผลึก



กระบวนการออกซิเดชัน

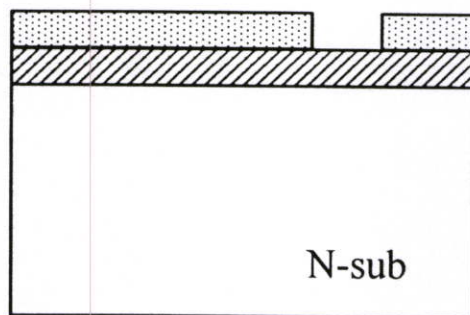


กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีพาสก์ที่ 1



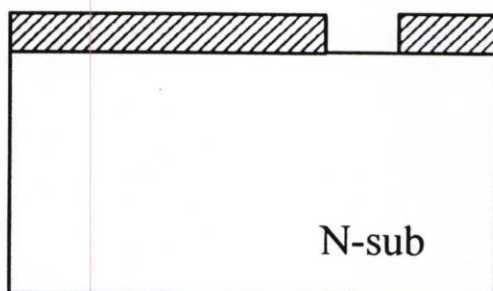
รูปที่ 4.25 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (ก)-(ค)

กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง (develop)



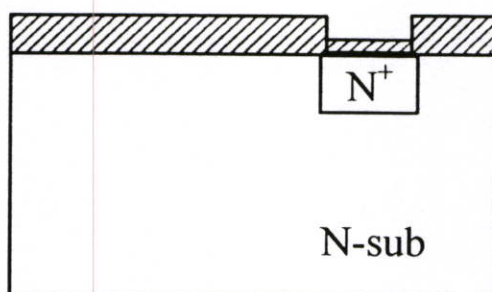
(ง)

กระบวนการสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (etching)



(จ)

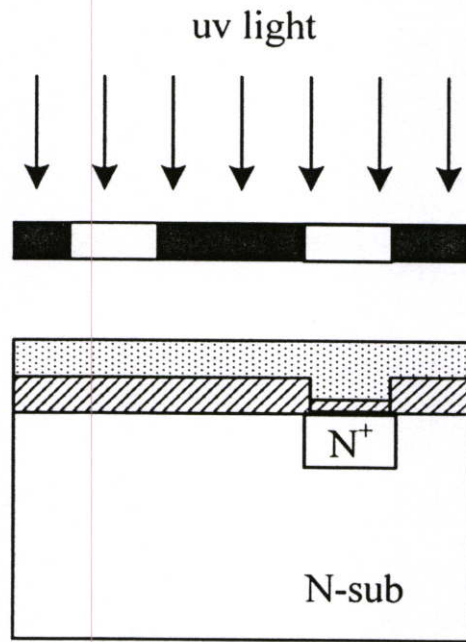
กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างส่วนเบส



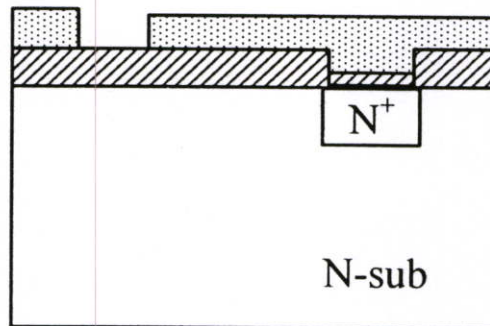
(ฉ)

รูปที่ 4.25 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (ง)-(ฉ)

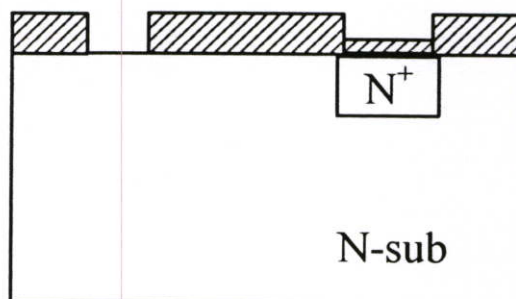
กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาส์คที่ 2



กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง (develop) มาส์คที่ 2

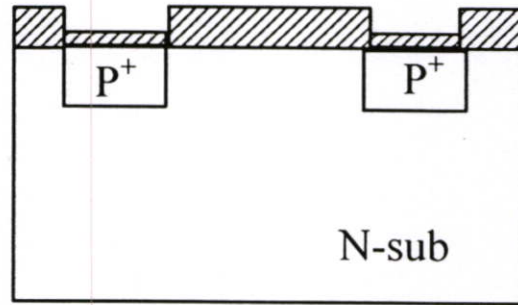


กระบวนการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (etching) มาส์คที่ 2



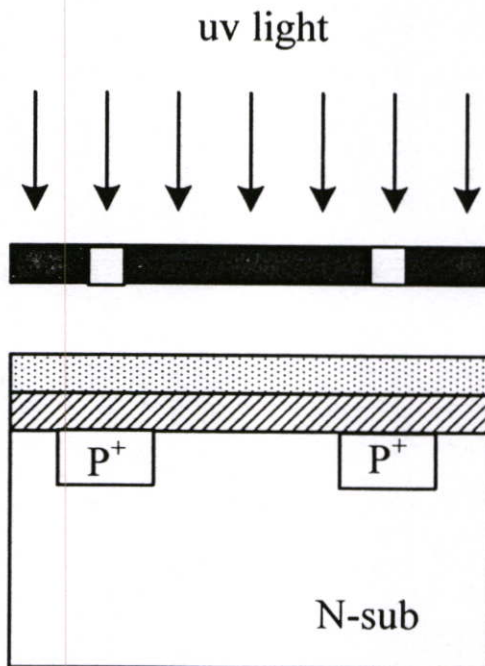
รูปที่ 4.25 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างของเมกนีโดทรานซิสเตอร์สามขา (ข)-(ง)

กระบวนการแพร่สารเจือ โบรอน ได้ส่วนอิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์



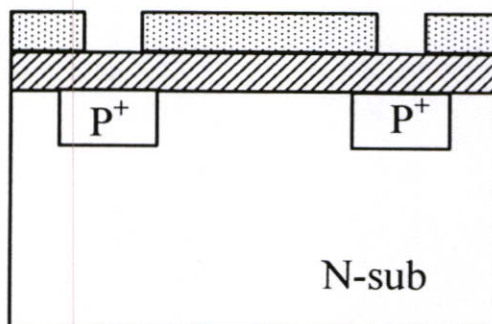
(ญ)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีมาสก์ที่ 3



(ฎ)

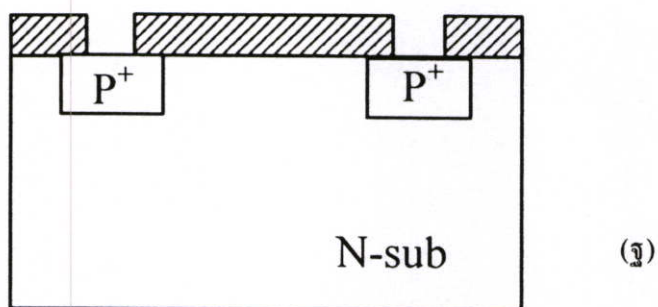
กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง (develop) มาส์คที่ 3



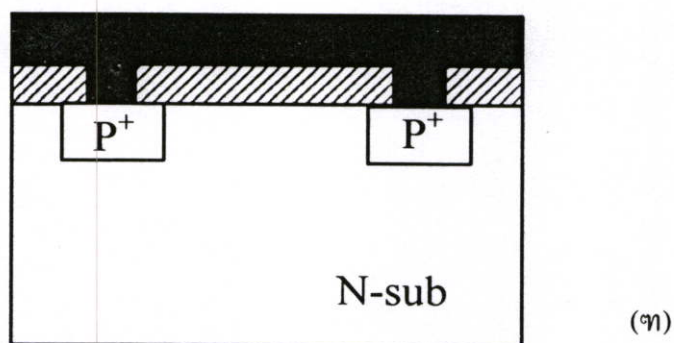
(ฏ)

รูปที่ 4.25 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (ญ)-(ฎ)

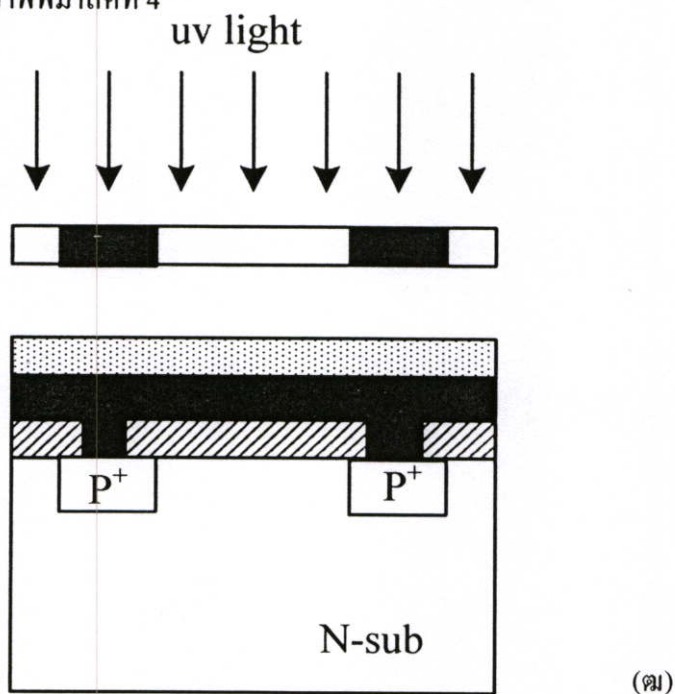
กระบวนการสกัดชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ (etching) มาส์คที่ 3



กระบวนการเคลือบชั้นอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการระเหยในสุญญากาศ Evaporation

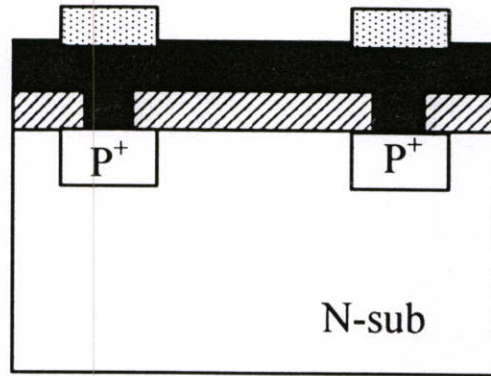


กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาส์คที่ 4



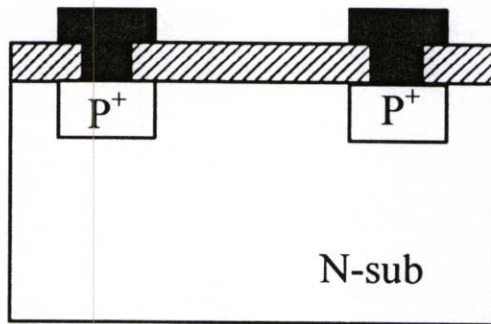
รูปที่ 4.25 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (จ)-(ค)

กระบวนการล้างน้ำยาไวแสง (develop) มาส์คที่ 4



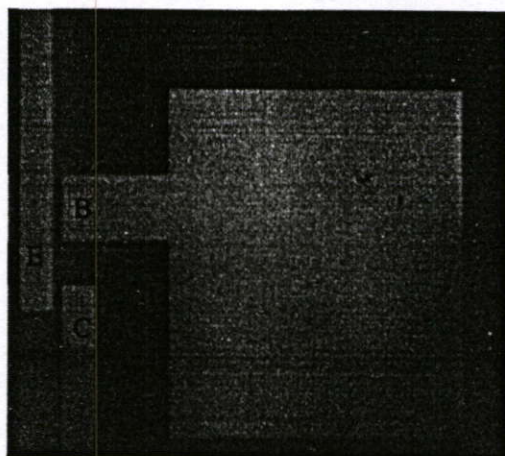
(ข)

\* กระบวนการสกัดชั้นโลหะมาส์คที่ 4 และ กระบวนการฉินเตอร์

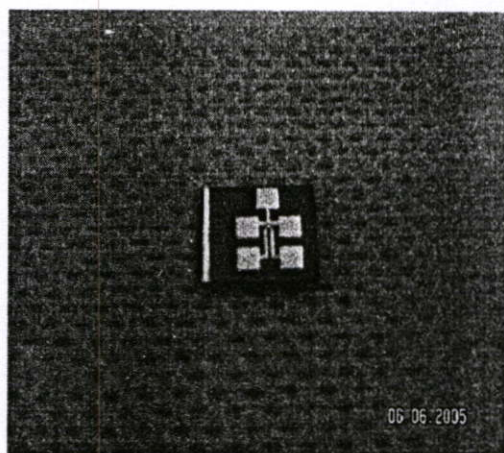


(ค)

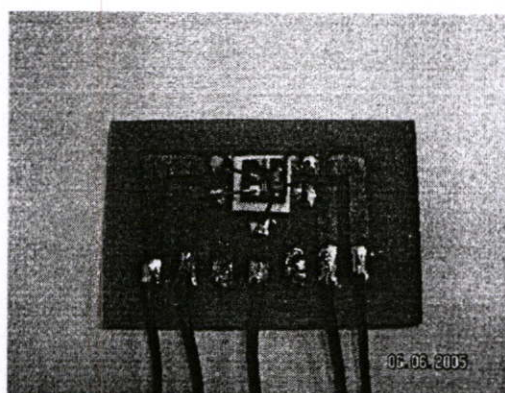
รูปที่ 4.25 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (ข)-(ค)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (ก) ภาพถ่ายด้านบน  
(ข) ภาพถ่ายอุปกรณ์แสดงขั้วใช้งานและ (ค) ภาพถ่ายอุปกรณ์การต่อขั้วใช้งาน

## บทที่ 5

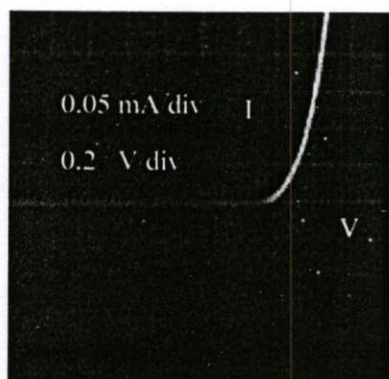
### การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะแสดงการทดลองและผลการทดลองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาและสามขา แสดงการวัดคุณสมบัติรอยต่อและความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ โดยแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาแสดงผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ ( $I_E$ ) และแรงดันภายนอก ( $V_A$ ) ค่าต่างๆ อีกทั้งยังแสดงการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งโดยการใช้โหมดการทำงานสามขั้วเพื่อเปรียบเทียบค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแต่ละโหมดการทำงาน แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาจะแสดงผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งในรูปแบบโครงสร้างปกติและรูปแบบโครงสร้างสองตัวรวมกระแส ทำการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวนอน โดยทำการทดลองเปลี่ยนแปลงกระแสการทำงานอิมิตเตอร์และทำการเปรียบเทียบความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนอีกด้วย

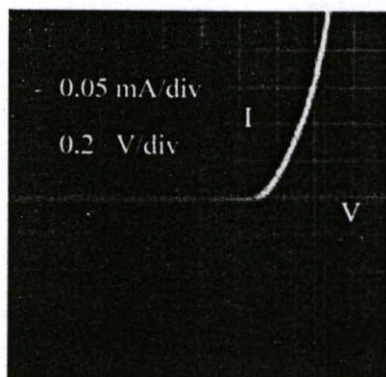
#### 5.1 การวัดคุณสมบัติแมกนีโตทรานซิสเตอร์

##### 5.1.1 การวัดรอยต่อพี-เอ็น

การวัดคุณสมบัติรอยต่อพี-เอ็นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นการวัดทดสอบเบื้องต้น แสดงคุณสมบัติรอยต่อพี-เอ็นของอุปกรณ์ซึ่งจากรูปการทดลองรูปที่ 5.1 แสดงคุณสมบัติของรอยต่อที่ขั้วใช้งานต่างๆ

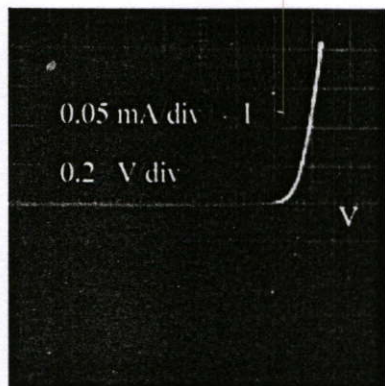


(ก) รอยต่อ B-C

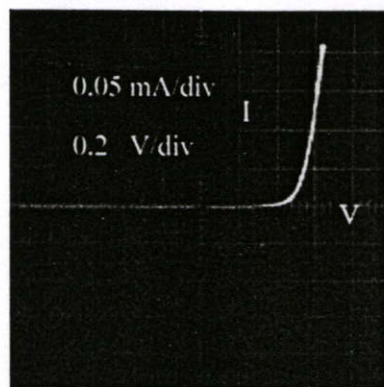


(ข) รอยต่อ B-E

รูปที่ 5.1 คุณสมบัติรอยต่อพี-เอ็นที่ขั้วใช้งานต่างๆของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา



(ก) รอยต่อ B-C

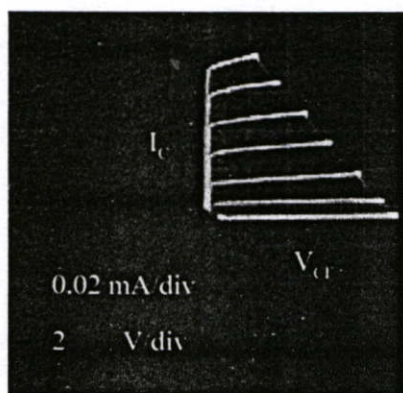


(ข) รอยต่อ B-E

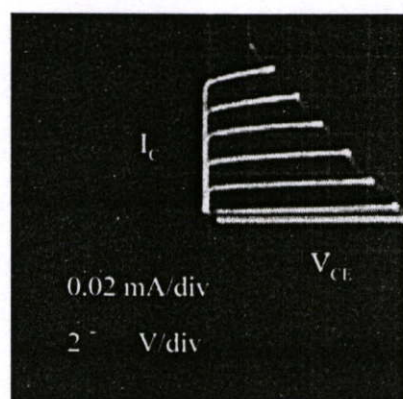
รูปที่ 5.2 คุณสมบัติรอยต่อพี-เอ็นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

### 5.1.2 การวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า

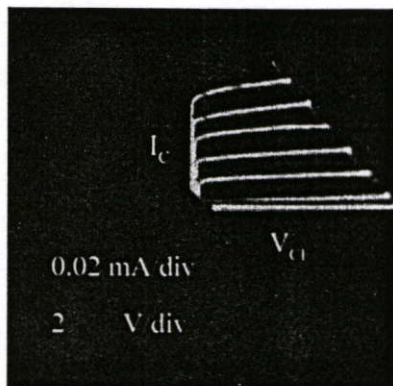
การวัดคุณสมบัติแมกนีโตทรานซิสเตอร์ด้วยเครื่องวัด Curve Tracer ซึ่งเป็นการทดสอบคุณสมบัติความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน (I-V Characteristic) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ แสดงการวัดทุกๆ รอยต่อของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาโดยทำการไบอัสกระแสเบสที่สเกล 0.1 mA/div ได้ผลการวัดดังรูปที่ 5.3 และผลการวัดของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา ดังรูปที่ 5.4



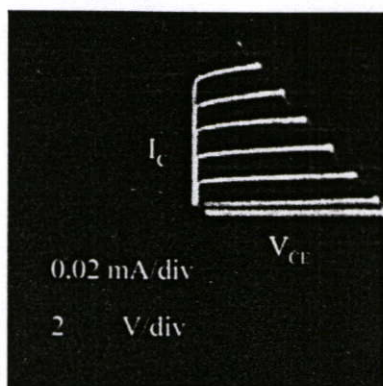
(ก) รอยต่อ B1-C1-E



(ข) รอยต่อ B1-C2-E

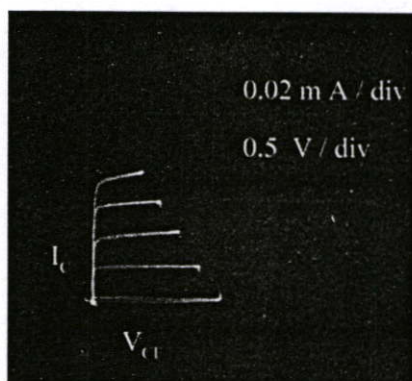


(ค) รอยต่อ B2-C1-E



(ง) รอยต่อ B2-C2-E

รูปที่ 5.3 คุณสมบัติความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา



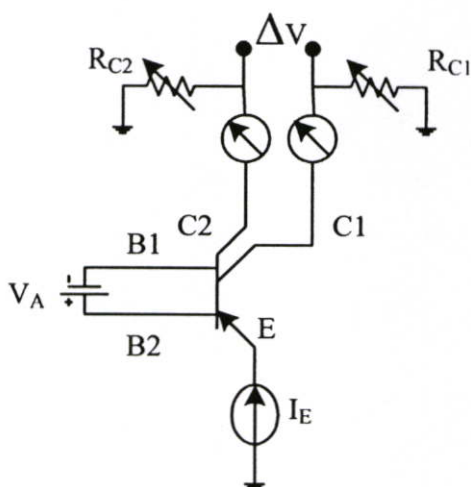
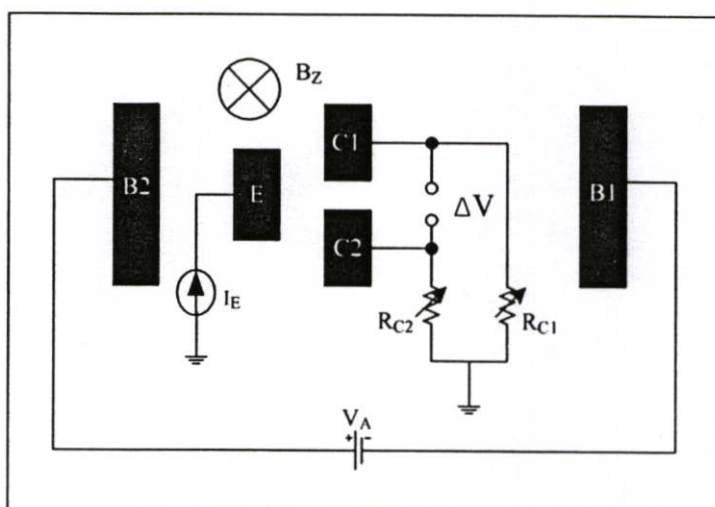
รูปที่ 5.4 คุณสมบัติความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

จากกราฟการทดลองความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน ( $I$ - $V$  Characteristic) รูปที่ 5.3 ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบและสร้างมีคุณสมบัติการทำงานเป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์ เนื่องจากออกแบบให้มีขนาดความกว้างเบสกว้างมากจึงทำให้มีอัตราขยายที่ต่ำ ( $\beta \ll 1$ ) เช่นเดียวกับผลการวัดของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา ดังรูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าในรูปแบบโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขามีคุณสมบัติการทำงานเป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์และมีอัตราขยายที่ต่ำเช่นเดียวกัน

## 5.2 การวัดผลตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา

### 5.2.1 วงจรการวัดทดลอง

รูปที่ 5.5 แสดงวงจรไบอัสการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ชนิด pnp สนามไฟฟ้าบริเวณเบสได้จากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ( $V_A$ ) ที่ให้ภายนอก ระหว่างขั้ว B2 และ B1 กระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E$  ใช้วงจรแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ขั้วคอลเลคเตอร์ C1 และ C2 ต่อกับความต้านทานปรับค่าได้  $R_{C1}$  และ  $R_{C2}$  เอาท์พุทแสดงเป็นความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้า  $\Delta V$  เนื่องจากความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง  $\Delta I_C$

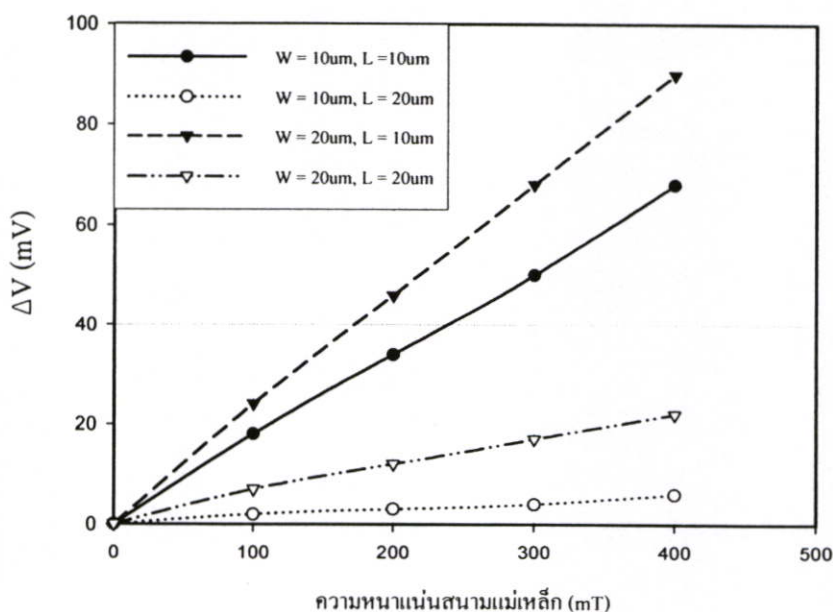


รูปที่ 5.5 วงจรไบอัสแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา

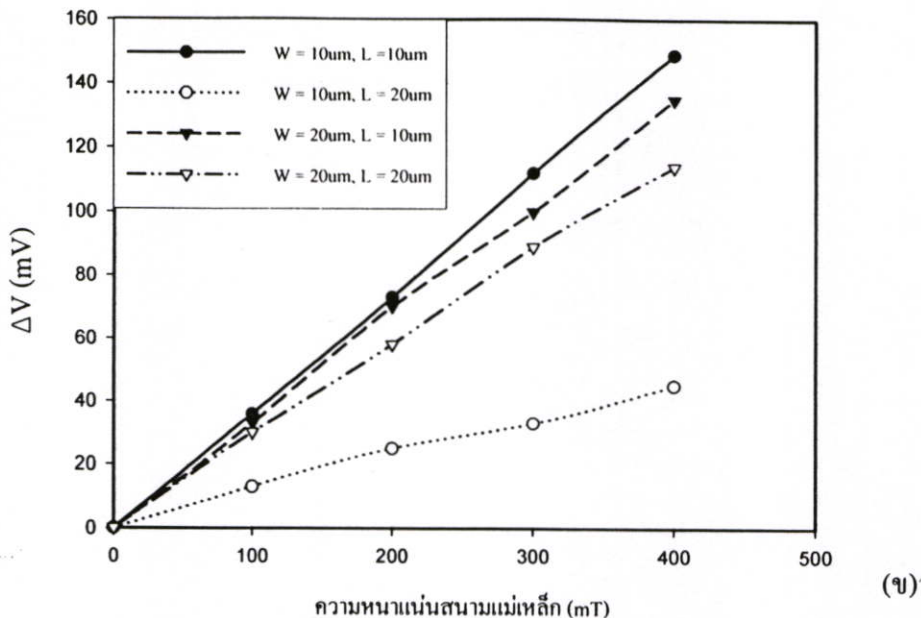
แมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในทิศทางแนวตั้ง (ทิศทาง Z) การตรวจจับสนามแม่เหล็กขึ้นกับการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) การไบอัสแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ( $V_A$ ) ระหว่างขั้ว B2 และ B1 เพื่อให้เกิดผลความแตกต่างเนื่องจากกระแสการฉีดจากการมอดดูเลทและสามารถเพิ่มสนามไฟฟ้าให้กับพาหะบริเวณเบสได้ การใช้แหล่งจ่ายกระแสเพื่อกำหนดกระแสอินพุทอิมิตเตอร์ให้คงที่โดยผลรวมกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองจะเท่ากับกระแสอินพุทอิมิตเตอร์ การปรับแรงดันออฟเซตสามารถปรับเป็นศูนย์ได้โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน  $R_{C1}$  และ  $R_{C2}$

### 5.2.2 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง

รูปที่ 5.6 (ก) แสดงผลการทดลองที่ค่ากระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E = 100 \mu A$  และ  $V_A = 5 V$  รูปที่ 5.6 (ข) แสดงผลการทดลองที่ค่ากระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E = 100 \mu A$  และ  $V_A = 10 V$  ผลการทดลองแสดงการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาทั้งสี่พารามิเตอร์ ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 – 400 mT กราฟที่ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของแรงดันเอาต์พุต  $\Delta V$  กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (mT)

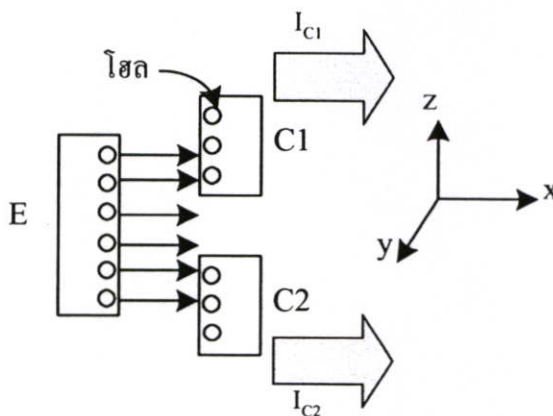


(ก)



รูปที่ 5.6 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งที่ค่ากระแสทำงานต่างๆ (ก)  $I_E = 100 \mu A$ ,  $V_A = 5 V$  และ (ข)  $I_E = 100 \mu A$ ,  $V_A = 10 V$

จากผลการทดลองรูปที่ 5.6 แสดงผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาและ ทดลองเปรียบเทียบค่าเอาต์พุตที่พารามิเตอร์ต่างๆ ในภาวะปกติไม่มีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านแมกนีโตทรานซิสเตอร์และได้รับการไบอัส พหะส่วนมาก (โวล) จะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ผ่านเบสไปคอลเลคเตอร์ C1 และ C2 ดังแสดงรูปที่ 5.7 ขั้วคอลเลคเตอร์ C1 และ C2 ได้รับปริมาณพหะเท่าๆกัน ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์  $I_{C1}$  และ  $I_{C2}$  เท่ากัน ไม่เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C = 0$ )

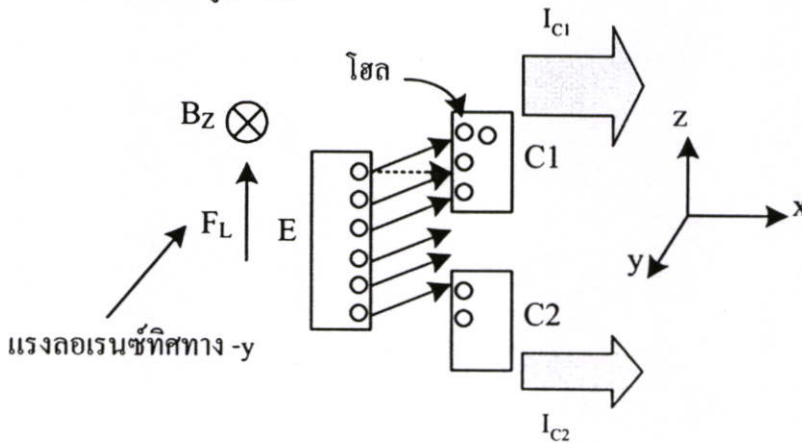


รูปที่ 5.7 ทิศทางการเคลื่อนที่ของโวลขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

### 5.2.3 กลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา

ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจาก 0 เป็น 100 mT นั่นคือมีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาทำให้เกิดมีแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ เนื่องจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขั้วอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนพาหะ (carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) จึงต้องพิจารณาพฤติกรรมการทำงานของกลไกทั้งสองได้ดังนี้

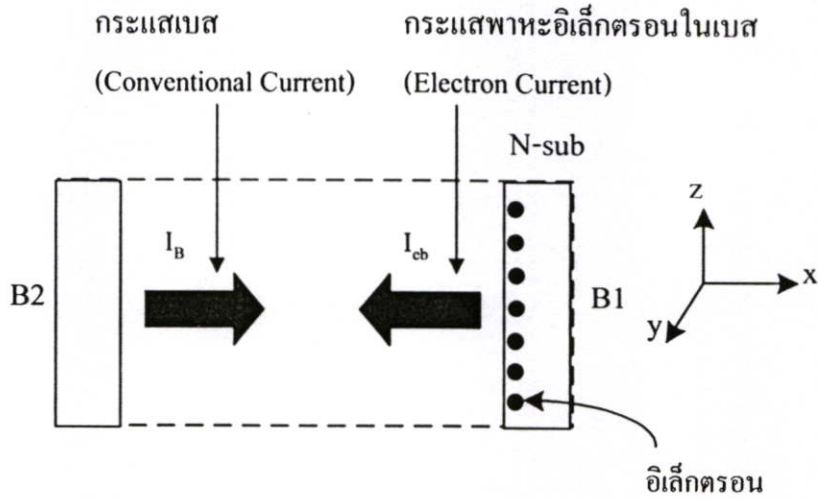
ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนพาหะ (carrier deflection) สามารถวิเคราะห์ได้จากพฤติกรรมของโฮล(hole) ซึ่งเป็นพาหะส่วนมากในอิมิตเตอร์โดยภาวะปกติเคลื่อนที่ในทิศทาง  $x$  จากอิมิตเตอร์ไปคอลเลคเตอร์ C1 และ C2 แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่าน ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง  $-y$  และแรงลอเรนซ์นี้จะกระทำกับโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปยังทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์ ดังแสดงรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ(โฮล)

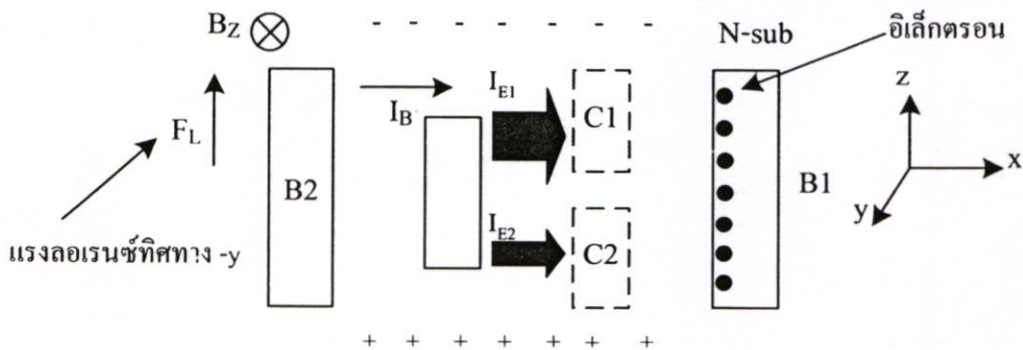
โฮลส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปสะสมที่คอลเลคเตอร์ C1 และมีโฮลอีกบางส่วนเคลื่อนที่ไปสะสมที่คอลเลคเตอร์ C2 แสดงให้เห็นว่ากระแสคอลเลคเตอร์  $I_{C1}$  มากกว่ากระแสคอลเลคเตอร์  $I_{C2}$  เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C \neq 0$ ) เพราะฉะนั้นค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จึงมากกว่าศูนย์ กลไกทำให้เกิดความแตกต่างนี้เรียกว่า การเบี่ยงเบนของพาหะ(carrier deflection)

ปรากฏการณ์กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) สามารถวิเคราะห์ได้จากพฤติกรรมของอิเล็กตรอน (electron) โดยปกติที่ขั้วเบส B2 และ B1 ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจึงมีกระแสเบส  $I_B$  มีทิศทางการเคลื่อนที่จากขั้วเบส B2 ไปขั้ว B1 ( ทิศทาง  $x$  ) และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้ว B1 ไป B2 ( ทิศทาง  $-x$  ) เนื่องจากอุปกรณ์เป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิด pnp ใช้งานร่องชนิดเอ็น อิเล็กตรอนจึงมีปริมาณสม่ำเสมอทั้งด้านบนและด้านล่างของอุปกรณ์ ดังแสดงรูปที่ 5.9



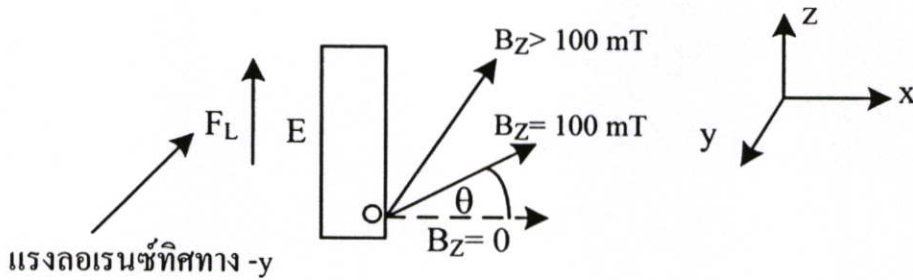
รูปที่ 5.9 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

แรงลอเรนซ์ซึ่งมีทิศทาง  $-y$  กระทำกับอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทาง  $-x$  ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปยังทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนสะสมบริเวณด้านบนของอุปกรณ์ ด้านล่างตรงข้ามจึงมีประจุบวกเกิดขึ้นเกิดความต่างศักย์ระหว่างด้านบนกับด้านล่างของอุปกรณ์ จากรูป 5.10 แสดงให้เห็นว่าบริเวณรอยต่ออิมิตเตอร์-เบส ด้านบนของอิมิตเตอร์จะมีแรงดันตกคร่อมรอยต่อเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีประจุไฟฟ้าลบสะสม ตรงข้ามกับบริเวณรอยต่ออิมิตเตอร์-เบสด้านล่างจะมีแรงดันตกคร่อมรอยต่อลดลงเนื่องจากการสะสมประจุไฟฟ้าบวก อิมิตเตอร์จะมีอัตราการฉีดพาหะระหว่างด้านบนและด้านล่างไม่เท่ากัน ทำให้คอลเลกเตอร์ C1 และ C2 มีค่าไม่เท่ากันเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C \neq 0$ ) กลไกที่ทำให้เกิดความแตกต่างของกระแสไฟฟ้านี้เรียกว่ากระแสการฉีดจากการมอดูเลต (modulation current injection)



รูปที่ 5.10 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ(อิเล็กตรอน)

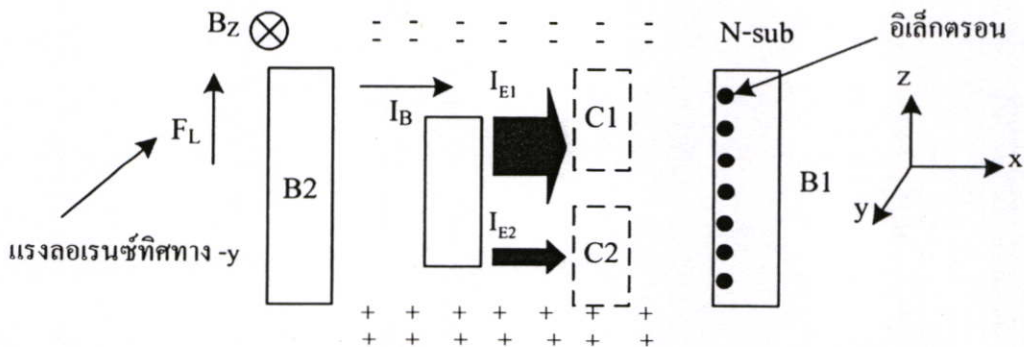
การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 100 ถึง 400 mT จากผลการทดลองรูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ในแต่ละพารามิเตอร์จะมีความชันเพิ่มขึ้นหรือค่าแรงดันเอาท์พุทที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กแรงลอเรนซ์จะมีแรงกระทำกับพาหะมากขึ้นตามสมการที่ (2.2)  $|\overline{F}_L| = F_L = e \cdot v_{Dx} \cdot B_z$  พาหะถูกแรงกระทำจากแรงลอเรนซ์มากขึ้นทำให้พาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในมุมที่กว้างขึ้นตามสมการที่ (2.36)  $\tan \theta_H = \mu_p \cdot B_z$  เพราะฉะนั้นพาหะ (โฮล) บางส่วนที่สะสมที่ขั้วคอลเลคเตอร์ C2 จะเบี่ยงเบนในมุมที่กว้างขึ้นและไปสะสมที่ขั้วคอลเลคเตอร์ C1 ดังแสดงรูปที่ 5.11 จึงทำให้กระแสคอลเลคเตอร์  $I_{C1}$  เพิ่มขึ้นตรงข้ามกับกระแสคอลเลคเตอร์  $I_{C2}$  ที่ลดลง ตามสมการความสัมพันธ์  $\Delta I_C = K_g (\mu_p) \cdot B_z \cdot I_E$



รูปที่ 5.11 พาหะ(โฮล)เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในมุมที่กว้างขึ้นตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

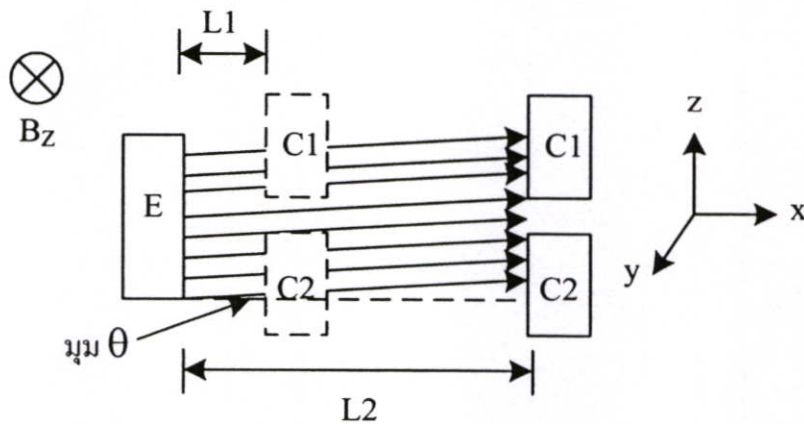
#### 5.2.4 ผลของแรงดันไฟฟ้า $V_A$ ที่มีต่อเอาท์พุทของอุปกรณ์

การทดลองการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_A$  จาก 5 V เป็น 10 V จากรูปผลการทดลองที่ 5.6 สามารถทำให้ค่าแรงดันเอาท์พุท  $\Delta V$  เพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้า เป็นการทำให้กลไกการเกิดความแตกต่างจากผลของกระแสการฉีดจากการมอดคูเลทมีผลต่ออุปกรณ์มากขึ้น นั่นคือบริเวณรอยต่ออิมิตเตอร์-เบสด้านบนจะฉีดปริมาณพาหะมากขึ้นซึ่งตรงข้ามกับรอยต่ออิมิตเตอร์-เบสด้านล่าง คอลเลคเตอร์ C1 จะสะสมพาหะที่ถูกฉีดจากด้านบนของอิมิตเตอร์มากขึ้นเป็นผลให้มีกระแส  $I_{C1}$  สูงขึ้นตรงข้ามกระแสคอลเลคเตอร์  $I_{C2}$  ที่ลดลง กราฟความสัมพันธ์ที่วัดได้จึงมีความชันมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า  $V_A$  วิเคราะห์การทำงานจากรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 ผลของการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้า  $V_A$

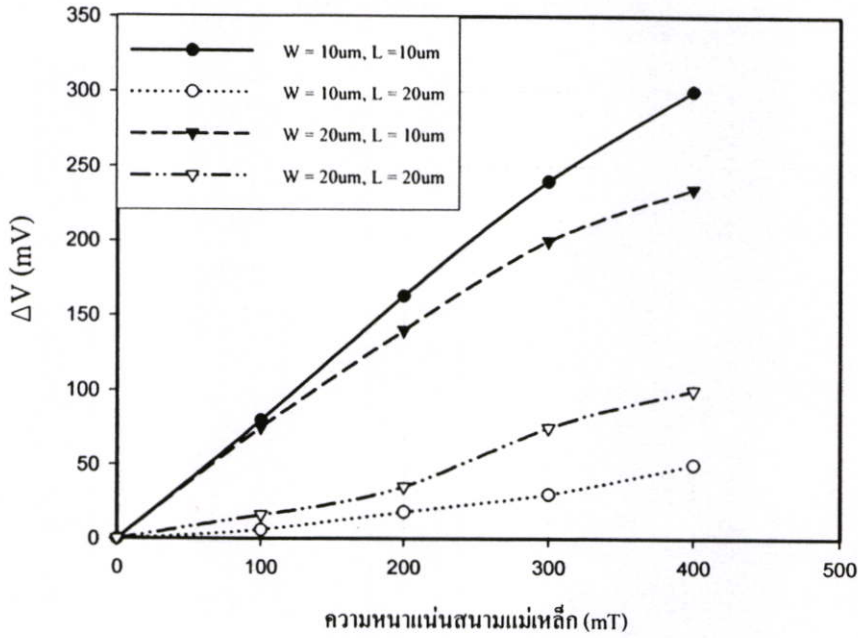
จากผลการทดลองรูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบความชันของกราฟความสัมพันธ์ที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ พารามิเตอร์ที่ 2  $W = 20\mu\text{m}$ ,  $L = 10\mu\text{m}$  และพารามิเตอร์ที่ 4  $W = 10\mu\text{m}$ ,  $L = 10\mu\text{m}$  มีค่าเอทพุทที่สูงกราฟความสัมพันธ์จึงมีความชันมากกว่าพารามิเตอร์อื่นๆ ซึ่งตรงข้ามกับพารามิเตอร์ที่ 3  $W = 10\mu\text{m}$ ,  $L = 20\mu\text{m}$  มีค่าเอทพุทที่น้อยทำให้ความชันของกราฟต่ำ จากผลการทดลองแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความยาวเบส  $L$  จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเอทพุท ( $\Delta I_C$ ) โดยระยะความกว้างระหว่างคอลเลกเตอร์ทั้งสอง  $W$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้อย โดยส่วนใหญ่ อุปกรณ์โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์จะออกแบบความยาวเบส  $L$  ไม่เกิน  $20\mu\text{m}$  จากการทดลองที่ระยะ  $L=10\mu\text{m}$  เป็นระยะที่พาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปสะสมที่ขั้วคอลเลกเตอร์  $C1$  มากกว่าที่ระยะ  $L=20\mu\text{m}$  โดยการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้า  $V_A$  จะแสดงผลของกระแสการฉีดจากการมอดดูเลทที่ทำให้พารามิเตอร์มีค่าตรงตามการออกแบบ จากการทดลองไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าระยะความยาวเบสเท่าใดที่ให้ค่าเอทพุทได้มากที่สุด โดยจากรูปที่ 5.13 ที่ระยะ  $L_1$  จะมีระยะที่ใกล้กว่า  $L_2$  นั่นคือการเคลื่อนที่ของพาหะที่เบี่ยงเบนไปถึงคอลเลกเตอร์มีค่าไม่เท่ากัน แสดงให้เห็นว่าความยาวเบสที่ความยาวต่างๆสามารถทำให้เอทพุทเปลี่ยนแปลงได้



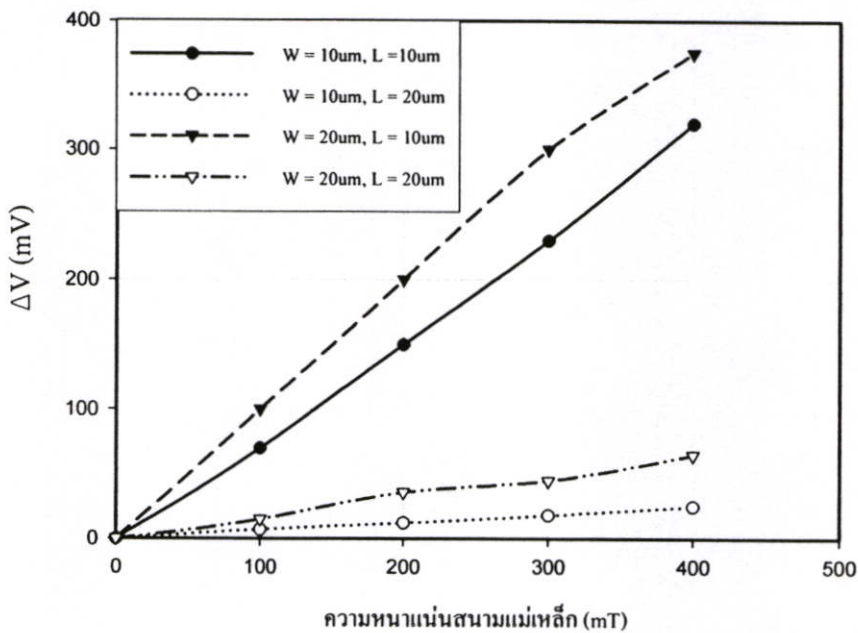
รูปที่ 5.13 ระยะการเบี่ยงเบน  $L$  ที่มีผลต่อเอทพุท  $\Delta I_C$

### 5.2.5 ผลกระแสการทำงาน $I_E$ ที่มีต่อเอทพุทของอุปกรณ์

การทดลองนี้แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์ที่มีผลต่อเอทพุทของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาโดยทดลองที่ค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_A$  คงที่ รูปที่ 5.14 แสดงผลการทดลองที่ค่ากระแสการทำงาน  $I_E = 200\ \mu\text{A}$ ,  $V_A = 10\ \text{V}$  และ ที่ค่ากระแสการทำงาน  $I_E = 300\ \mu\text{A}$ ,  $V_A = 10\ \text{V}$  เป็นการทดลองที่แสดงว่าการเพิ่มกระแสการทำงานอิมิตเตอร์สามารถทำให้ค่าเอทพุทเพิ่มขึ้นตามสมการที่ (2.31)  $\Delta I_C = K_g (\mu_p + \mu_n) \cdot B_z \cdot I_E$



(ก)

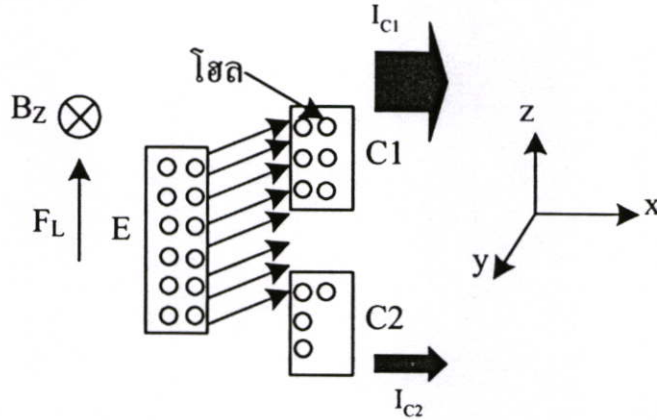


(ข)

รูปที่ 5.14 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กที่ค่ากระแสทำงานต่างๆ (ก)  $I_E = 200 \mu\text{A}, V_A = 10 \text{ V}$   
และ (ข)  $I_E = 300 \mu\text{A}, V_A = 10 \text{ V}$

จากผลการทดลองรูปที่ 5.14 แสดงผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา เมื่อทำการเพิ่มค่ากระแสการทำงานมากขึ้น กราฟของทุกๆพารามิเตอร์ที่ได้มีค่าแรงดันเอาต์พุต  $\Delta V$  มากขึ้นทำให้ความชันมากขึ้นเปรียบเทียบผลการทดลองรูปที่ 5.6 แสดงถึงเอาต์พุต  $\Delta I_C$  ที่แปรผันตามกระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E$  การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงาน

อิมิตเตอร์นั้นคือเป็นการเพิ่มการฉีดพาหะโฮลจากอิมิตเตอร์ไปคอลเลคเตอร์มากขึ้น คอลเลคเตอร์ C1 จึงสะสมปริมาณพาหะที่เบี่ยงเบนทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C$ ) มากขึ้น วิเคราะห์การทำงานเมื่อทำการเพิ่มค่ากระแสการทำงานอิมิตเตอร์สามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 ปริมาณพาหะ(โฮล)ที่เพิ่มขึ้นตามกระแสการทำงานอิมิตเตอร์

### 5.2.6 ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก (sensitivity)

ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก หมายถึง อัตราส่วนของสัญญาณเอาต์พุตหรือการตอบสนองของอุปกรณ์วัดต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุต ในโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามารถหาได้โดยสมการที่ (2.32) คือ  $S_R = \Delta I_C / I_0 \cdot \Delta B_z$  เรียกว่าความไวสัมพัทธ์ (relative sensitivity) และสมการที่ (2.33) คือ  $S_A = \Delta V / \Delta B_z$  เรียกว่า ความไวสัมบูรณ์ (absolute sensitivity) เนื่องจากผลการทดลองที่รูป 5.6 และ 5.14 ค่าเอาต์พุตถูกวัดในรูปแบบความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กจึงคำนวณจากสมการที่ (2.30) โดยตารางที่ 5.1 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่กระแสการทำงาน  $I_E = 100 \mu A$  เปลี่ยนแปลง ค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_A = 5 V$  และ  $V_A = 10 V$  จากตารางที่ 5.1 แสดงการเพิ่มขึ้นของค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_A$  โดยที่พารามิเตอร์ที่ 2 และ 4 มีค่าความไวที่สูงเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ที่ 1 และ 3

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่  $I_E = 100 \mu A$

$V_A$	$V_A = 5 V$				$V_A = 10 V$			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
MT								
S (V/T)	0.06	0.23	0.02	0.17	0.29	0.34	0.11	0.37

โดย P1-P4 คือ พารามิเตอร์ที่ 1 – พารามิเตอร์ที่ 4

MT คือ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_A = 10$  V โดยทำการเปลี่ยนแปลงกระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E = 200 \mu\text{A}$  และ  $I_E = 300 \mu\text{A}$  จากตารางที่ 5.2 ค่าความไวของพารามิเตอร์ที่ 2 และ 4 มีค่าเพิ่มขึ้นแต่พารามิเตอร์ที่ 1 และ 3 ค่าความไวจากการคำนวณลดลงเล็กน้อยเนื่องจากความกว้างเบส  $L$  ที่กว้างมากการเปลี่ยนแปลงกระแสการทำงานอิมิตเตอร์ไม่มากพอที่จะทำให้ค่าความไวเพิ่มขึ้นได้

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่  $V_A = 10$  V

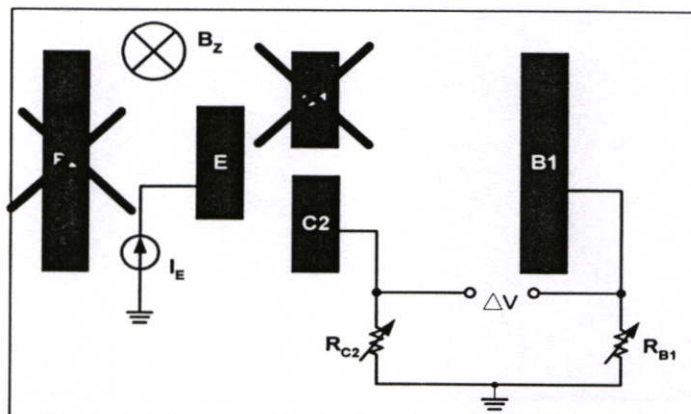
$I_E$	$I_E = 200 \mu\text{A}$				$I_E = 300 \mu\text{A}$			
MT	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
S (V/T)	0.25	0.58	0.12	0.75	0.16	0.93	0.06	0.8

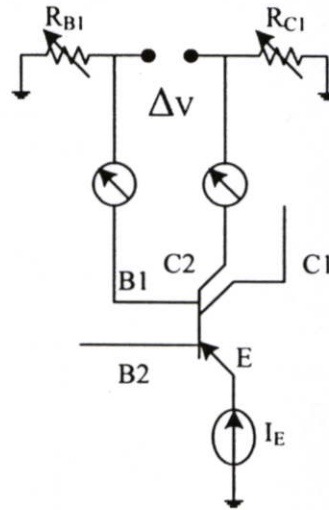
### 5.3 การวัดผลตอบสนองสนามแม่เหล็กโหมคการทำงานสามขา

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขั้วสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งได้โดยการใช้เพียงสามขาคือ อิมิตเตอร์, คอลเลคเตอร์ C2 และ เบส B1 ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัวในเบสเป็นกระแสเบสและพาหะที่สะสมคอลเลคเตอร์เป็นกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) การทดลองนี้เป็นพื้นฐานในการลดจำนวนขั้วของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เพื่อการพัฒนาโครงสร้างเป็นอุปกรณ์เดี่ยวต่อไป

#### 5.3.1 วงจรการวัดทดลอง

รูปที่ 5.16 แสดงวงจรไบอัสการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาในโหมคการทำงานสามขา โดยใช้อิมิตเตอร์ E, คอลเลคเตอร์ C2 และเบส B1 ที่คอลเลคเตอร์ C2 และเบส B1 ต่อความต้านทานปรับค่าได้  $R_{C2}$  และ  $R_{B1}$  โดยเอาที่พหุคือความแตกต่างระหว่างกระแสเบส  $I_{B1}$  และกระแสคอลเลคเตอร์  $I_{C2}$  ถูกวัดในรูปแบบความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้า ( $\Delta V$ )

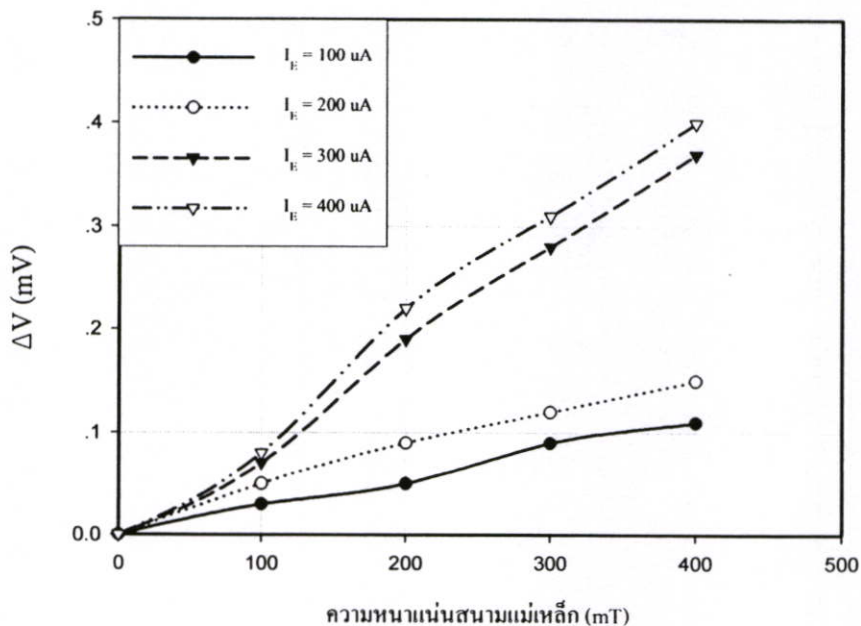




รูปที่ 5.16 วงจรไบอัสการทำงานสามขาของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา

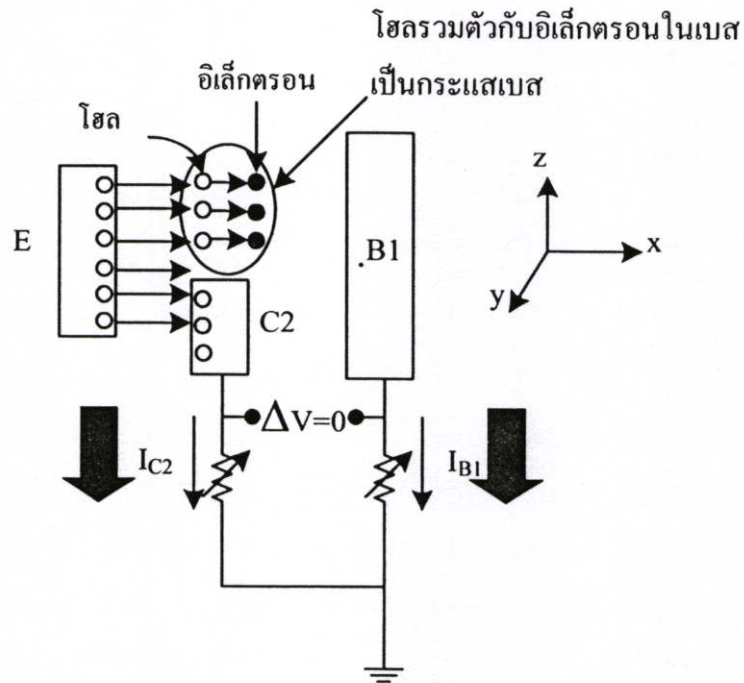
### 5.3.2 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง

รูปที่ 5.17 แสดงผลการทดลองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างห้าขาในโหมดการทำงานสามขาที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E = 100, 200, 300$  และ  $400 \mu\text{A}$  ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ว่า  $0-400 \text{ mT}$  กราฟที่ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของแรงดันเอาต์พุต  $\Delta V$  กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก



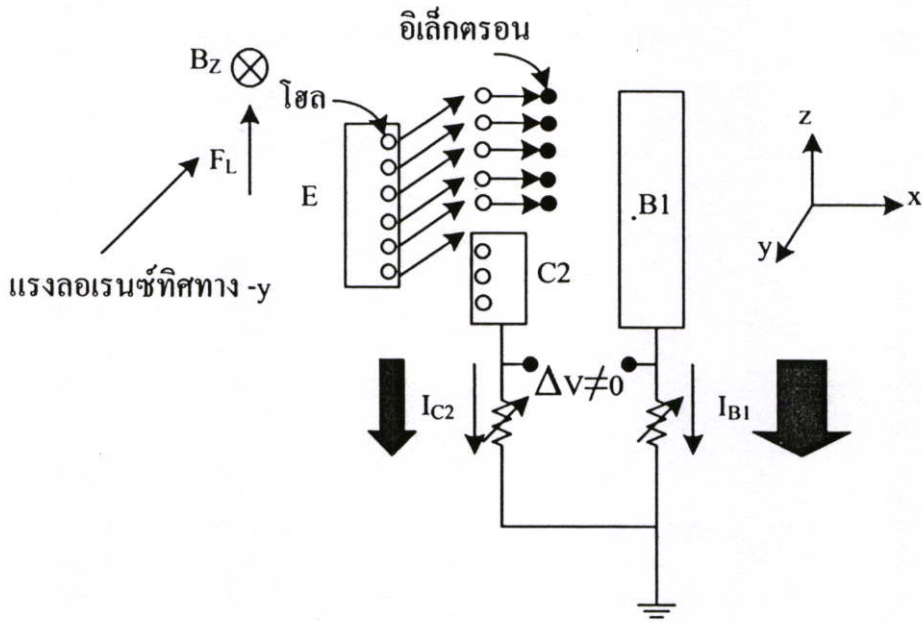
รูปที่ 5.17 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งที่ค่ากระแสการทำงานต่างๆ.

จากผลการทดลองรูปที่ 5.17 แสดงการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งแนวตั้งของ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาในโหมดการทำงานสามขาโดยทำการทดลองที่พารามิเตอร์  $W = 20 \mu\text{m}$ ,  $L = 10 \mu\text{m}$  ซึ่งในภาวะปกติไม่มีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่าน และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ได้รับการไบอัส โวลจะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปเบส โดยที่โวลจะเกิดการรวมกับอิเล็กตรอนใน เบสกลายเป็นกระแสเบส  $I_{B1}$  และโวลอีกส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่ต่อไปคอลเลคเตอร์  $C2$  จะกลายเป็น กระแสคอลเลคเตอร์  $I_{C2}$  ซึ่งกระแสเบส  $I_{B1}$  และกระแสคอลเลคเตอร์  $I_{C2}$  เท่ากันไม่เกิดความ แตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าทั้งสอง ( $\Delta I_{CB} = 0$ ) ดังแสดงรูปที่ 5.18



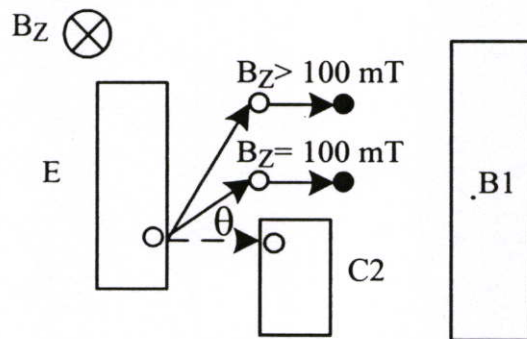
รูปที่ 5.18 ทิศทางการเคลื่อนที่ของโวลในโหมดการทำงานสามขา

จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจาก 0 เป็น 100 mT นั่นคือมี สนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านแมกนีโตทรานซิสเตอร์เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง  $-y$  กระทบกับโวล ที่เคลื่อนที่ในทิศทาง  $x$  แรงลอเรนซ์กระทบกับโวลทำให้โวลเบี่ยงเบนตามทิศทางของแรงลอเรนซ์ โดยที่โวลจะเบี่ยงเบนออกจากคอลเลคเตอร์  $C2$  พหุส่วนนี้จะรวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสจะ กลายเป็นกระแสเบส  $I_{B1}$  พหุส่วนหนึ่งจะเบี่ยงเบนไปสะสมที่คอลเลคเตอร์  $C2$  จะกลายเป็น กระแสคอลเลคเตอร์  $I_{C2}$  จากการทดลองกระแสเบส  $I_{B1}$  มากกว่า  $I_{C2}$  แสดงว่าพหุที่รวมตัวในเบส มากกว่าพหุเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลคเตอร์ ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าทั้งสอง ( $\Delta I_{CB} \neq 0$ ) ดังแสดงรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ(โฮล)ในภาวะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

การเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจาก 100 ถึง 400 mT ทำให้ปริมาณแรงลอเรนซ์กระทำพาหะเพิ่มมากขึ้นตามสมการที่ (2.36)  $\tan \theta_H = \mu_p \cdot B_z$  พาหะเบี่ยงเบนตามทิศทางแรงลอเรนซ์เพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นจะมีพาหะที่เบี่ยงเบนสะสมคอลเลคเตอร์ C2 บางส่วนทำมุมกว้างขึ้นทำให้ไปรวมตัวกับอิเล็คตรอนในเบสกลายเป็นกระแสเบส  $I_{B1}$  กระแสเบสเพิ่มขึ้นแต่กระแสคอลเลคเตอร์จะลดลงทำให้ค่าเอาท์พุท  $\Delta V$  เพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็กวิเคราะห์การทำงานดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 พาหะ(โฮล)เคลื่อนที่ในมุมเบี่ยงเบนที่กว้างขึ้นตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงกระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E$  เพิ่มขึ้นจาก 100 จนถึง 400  $\mu\text{A}$  จะทำให้การฉีดพาหะโฮลจากอิมิตเตอร์เพิ่มขึ้น โฮลที่เกิดการรวมตัวในเบสเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ความแตกต่างระหว่างกระแสเบส  $I_{B1}$  และ กระแสคอลเลคเตอร์  $I_{C2}$  มากขึ้น ดังแสดงผลการทดลองรูปที่ 5.18 จากผลการทดลองกราฟความสัมพันธ์ในแต่ละกระแสการทำงานอิมิตเตอร์จะไม่เพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากความยาวเบสที่กว้างมากและทำการทดลองการเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานน้อยเกินไป

### 5.3.3 ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก (sensitivity)

จากการคำนวณค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแสดงดังตารางที่ 5.3 การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์สามารถทำให้ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นได้ การไบอัสแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาโดยการใช้เพียงแหล่งจ่ายกระแสที่โดยอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนของพาหะเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีผลของกระแสฉีดจากการมอดดูเลททำให้ค่าความไวไม่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับการไบอัสแบบปกติ

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ที่  $I_E$  ค่าต่างๆ ในโหมดการทำงานสามขา

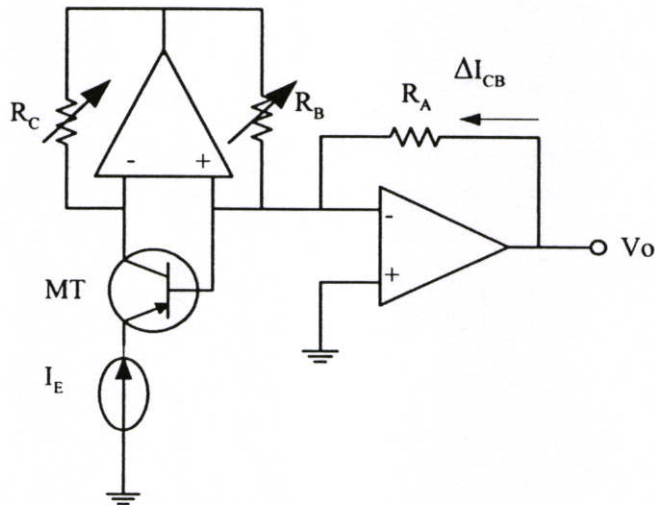
$I_E$ ( $\mu\text{A}$ )	100	200	300	400
S (mV/T)	0.275	0.375	0.92	1.15

## 5.4 การวัดผลตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวนอน โดยอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัว (recombination) ในเบสเป็นกระแสเบสและพาหะสะสมคอลเลคเตอร์เป็นกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) กลไกที่ทำให้เกิดความแตกต่างอาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) โดยไม่มีผลของกระแสฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) การทดลองจะแสดงผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนทำการเปรียบเทียบค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่กระแสการทำงานต่างๆ

### 5.4.1 วงจรการวัดทดลอง

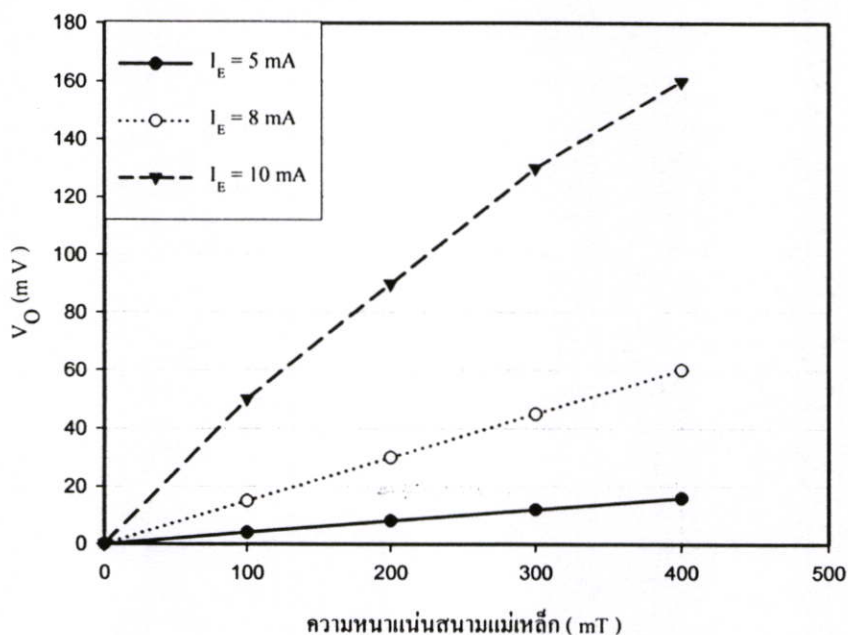
รูปที่ 5.21 แสดงวงจรการวัดทดลองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา ไบอัสกระแสการ ทำงานอิมิตเตอร์  $I_E$  ใช้วงจรแหล่งจ่ายกระแสที่ต่อกับอิมิตเตอร์ E โดยคอลเลกเตอร์ C และเบส B ต่อกับขาอินเวิร์ทติ้งและนอนอินเวิร์ทติ้งของวงจรขยาย (differential amplifier) ค่าออฟเซต สามารถเป็นศูนย์ได้โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน  $R_C$  และ  $R_B$  กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน  $R_A$  คือความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลกเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) โดยวัดเอาต์พุตในรูปแบบ ของแรงดันไฟฟ้า ( $V_O$ )



รูปที่ 5.21 วงจรการวัดทดลองแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

### 5.4.2 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง

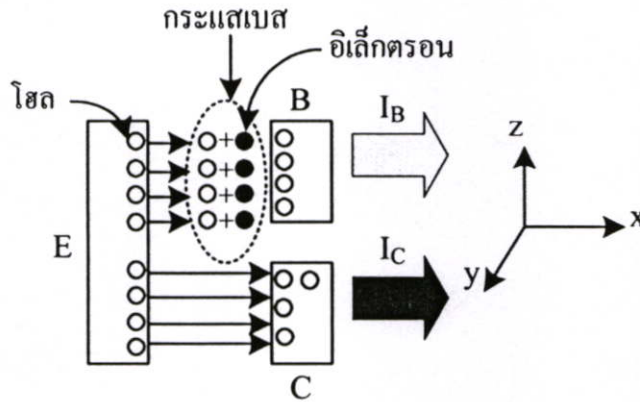
รูปที่ 5.22 แสดงผลการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง  $B_z$  ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาในรูปแบบโครงสร้างปกติโดยทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) กับกระแสการทำงานอิมิตเตอร์และความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก โดยทำการทดลองที่ค่ากระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E = 5, 8$  และ  $10 \text{ mA}$  โดยเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก  $0-400 \text{ mT}$  กราฟที่ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต  $V_O$  กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 5.22 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่กระแสการทำงานต่างๆ

จากผลการทดลองรูปที่ 5.22 แสดงการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาและทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าเอาต์พุตที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ต่างๆ ในภาวะปกติไม่มีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านตัวอุปกรณ์ ( $B_z=0$ ) และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ได้รับการไบอัส พาวเวอร์ (โวล) จะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปเบส โดยโวลจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนภายในเบสกลายเป็นกระแสเบสและโวลบางส่วนจะเคลื่อนที่ไปสะสมที่คอลเลคเตอร์กลายเป็นกระแสคอลเลคเตอร์ ทำให้พาวเวอร์ที่รวมตัวในเบสและพาวเวอร์ที่สะสมคอลเลคเตอร์มีปริมาณเท่าๆกันทำให้กระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์เท่ากัน ไม่เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าทั้งสอง ( $\Delta I_{CB}=0$ ) จึงทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้เท่ากับศูนย์ วิเคราะห์การทำงานแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขารูปแบบโครงสร้างปกติแสดงดังรูปที่ 5.23 ในภาวะปกตินี้วงจรการวัดการทดลองสามารถช่วยปรับเปลี่ยนกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ให้เท่ากันได้โดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน  $R_C$  และ  $R_B$  ซึ่งในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยากที่กระแสทั้งสองจะเท่ากันขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่าน อีกทั้งวงจรการวัดการทดลองนี้จะสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนต่างๆที่จะทำให้ค่าเอาต์พุตผิดเพี้ยนไปได้

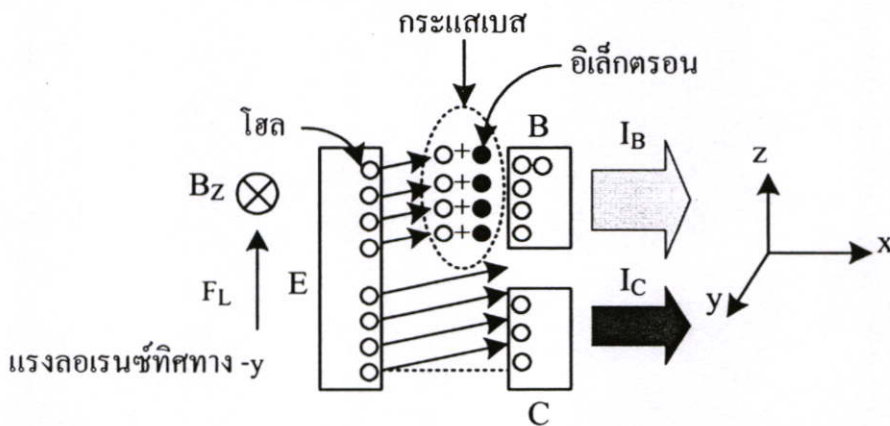
โซลรวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสเป็น



รูปที่ 5.23 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะ(โซล)ในภาวะปกติ

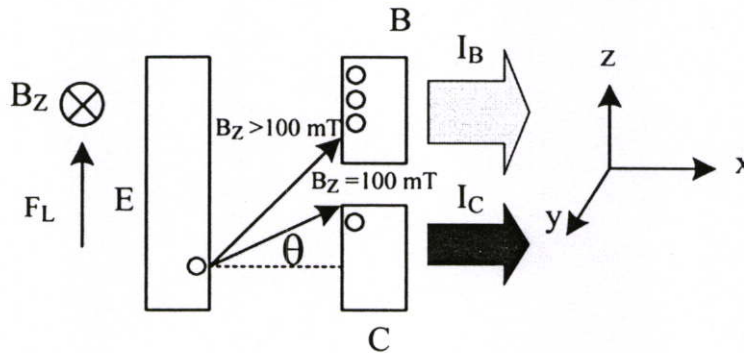
จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจาก 0 เป็น 100 mT นั่นคือมีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านตัวอุปกรณ์ทำให้เกิดมีแรงลอเรนซ์ทิศทาง  $-y$  แรงลอเรนซ์กระทำกับโซลซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทาง  $x$  ทำให้โซลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์จึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB} \neq 0$ ) ค่าแรงดันเอาท์พุท ( $V_o$ ) ที่วัดได้จึงมีค่ามากกว่าศูนย์ สามารถวิเคราะห์การทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขารูปแบบโครงสร้างปกติได้ดังรูปที่ 5.24 โดยโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขานั้นมีตำแหน่งของเบสและคอลเลคเตอร์ตรงข้ามกันและมีขนาดเท่ากัน โซลถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์จะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์ นั่นคือกระแสเบสเกิดจากโซลที่รวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสและพาหะบางส่วนที่เบี่ยงเบนสะสมที่เบส โดยที่จะมีโซลอีกบางส่วนเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลคเตอร์เป็นกระแสคอลเลคเตอร์ทำให้ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์  $v(\Delta I_{CB})$  มีค่าสูง

โซลรวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสเป็น



รูปที่ 5.24 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ(โซล)

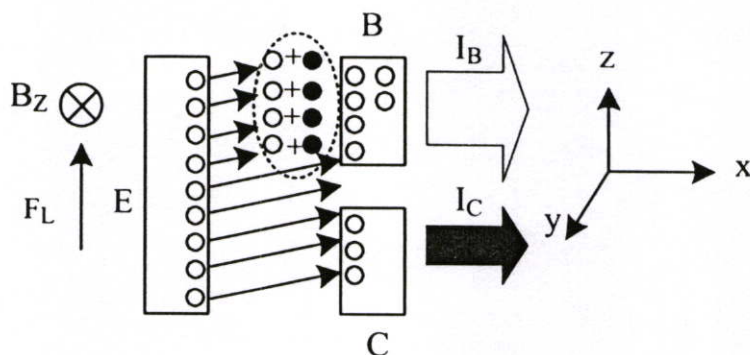
การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 100 ถึง 400 mT จากผลการทดลองรูปที่ 5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต  $V_0$  กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขั้วรูปแบบตัวเดี่ยวนั้นจะมีความชันเพิ่มขึ้นนั่นคือค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจะทำให้แรงลอเรนซ์มีแรงกระทำกับพาหะมากขึ้นตามสมการที่ (2.2) คือ  $|\overline{F}_L| = F_L = e \cdot v_{Drift} \cdot B_z$  พาหะถูกแรงกระทำจากแรงลอเรนซ์มากขึ้นทำให้พาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในมุมที่กว้างขึ้น สามารถแสดงได้ตามสมการที่ (2.36) คือ  $\tan \theta_H = \mu_p \cdot B_z$  วิเคราะห์การทำงานในรูปแบบโครงสร้างปกติ นั่นคือพาหะ(โฮล) บางส่วนที่เบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลคเตอร์เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในมุมที่กว้างขึ้นและไปสะสมที่ขั้วเบส ดังแสดงรูปที่ 5.25 จึงทำให้กระแสเบส  $I_B$  เพิ่มขึ้นแต่กระแสคอลเลคเตอร์  $I_C$  ลดลง ความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสอง ( $\Delta I_{CB}$ ) เพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุต ( $V_0$ ) เพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 5.25 พาหะ(โฮล)เคลื่อนที่ในมุมที่กว้างขึ้นตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

#### 5.4.3 ผลของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์ $I_E$

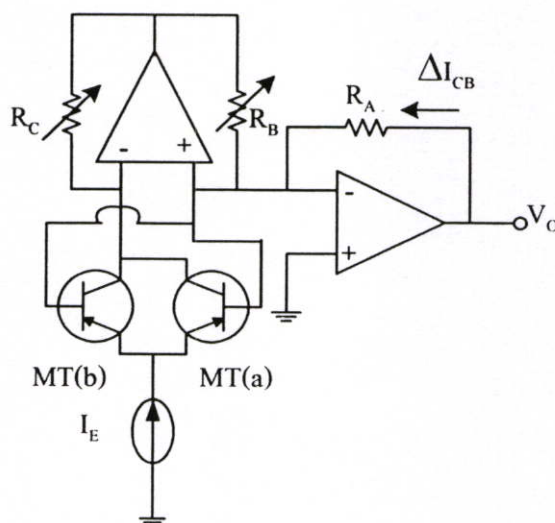
จากการทดลองรูปที่ 5.22 แสดงผลการทดลองเมื่อทำการเพิ่มค่ากระแสการทำงานอิมิตเตอร์จาก 5 mA เป็น 8 mA และ 10 mA กราฟความสัมพันธ์ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขั้วรูปแบบปกติมีความชันเพิ่มขึ้นนั่นคือค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์ การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์เป็นการเพิ่มปริมาณการฉีดพาหะโฮลจากอิมิตเตอร์ไปคอลเลคเตอร์มากขึ้น ปริมาณโฮลที่รวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสมากขึ้นทำให้ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์มากขึ้นตามสมการที่ (2.38) คือ  $\Delta I_{CB} = J_{py} \cdot W_E \cdot L \cdot \tan \theta_H$  โดยที่กระแสการทำงาน 10 mA มีค่าเอาต์พุตที่วัดได้มีค่าสูงและมีความเป็นเชิงเส้นที่ดี สามารถวิเคราะห์การทำงานเมื่อทำการเพิ่มค่ากระแสการทำงานอิมิตเตอร์ดังแสดงรูปที่ 5.26



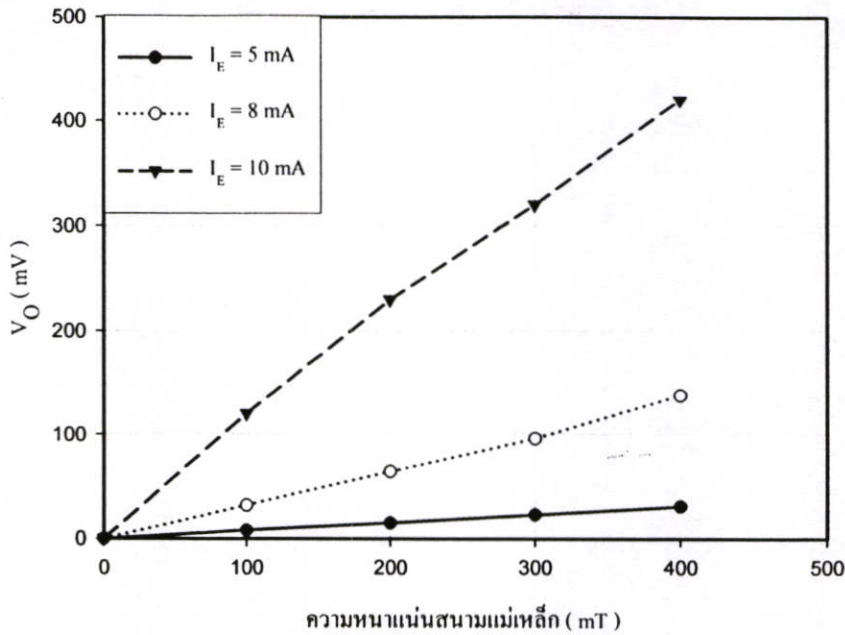
รูปที่ 5.26 การเพิ่มปริมาณการฉีดพาหะ(โฮล)เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสอิมิตเตอร์

#### 5.4.4 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งของรูปแบบโครงสร้างสองตัวรวมกระแส

รูปที่ 5.27 แสดงวงจรไบอัสแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาในรูปแบบโครงสร้างสองตัวรวมกระแส โดยในการวัดทดลอง โครงสร้างแบบสองตัวรวมกระแสคือการนำเอาที่พู่ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสองตัวที่มีทิศทางเบี่ยงเบนตรงข้ามกันมารวมกัน โดยเอาที่พู่  $\Delta I_{CB}$  อยู่ในรูปแบบของ  $[(I_{B(a)}+I_{B(b)})-(I_{C(a)}+I_{C(b)})]$  วิธีการวัดทดลองจะเหมือนกับโครงสร้างแบบปกติโดยจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเอาที่พู่ของอุปกรณ์กับกระแสการทำงานอิมิตเตอร์และความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก รูปที่ 5.28 แสดงผลการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา โครงสร้างสองตัวรวมกระแส ทำการทดลองที่ค่ากระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E=5 \text{ mA}$ ,  $8 \text{ mA}$  และ  $10 \text{ mA}$  โดยเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก  $0-400 \text{ mT}$  กราฟที่ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาที่พู่  $V_o$  กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

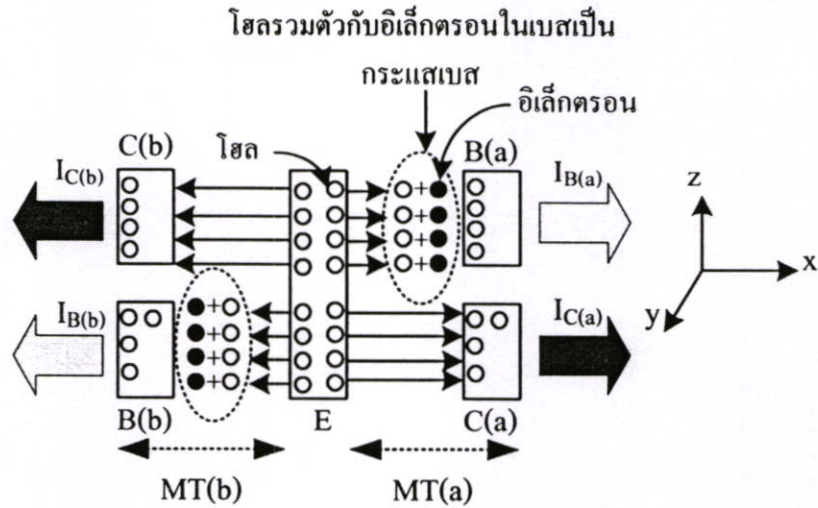


รูปที่ 5.27 วงจรวัดการทดลองแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาโครงสร้างสองตัวรวมกระแส



รูปที่ 5.28 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง โครงสร้างสองตัวรวมกระแสที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ต่างๆ

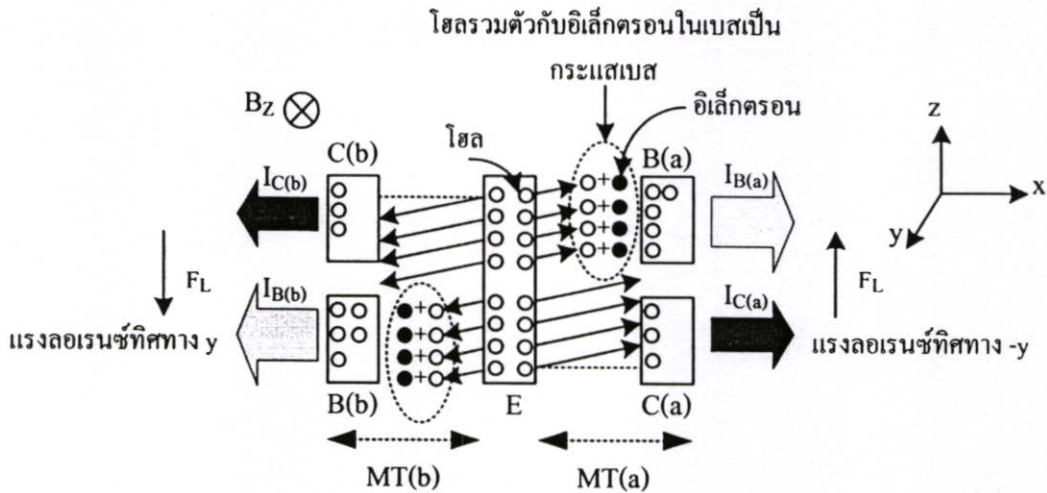
จากผลการทดลองรูปที่ 5.28 แสดงผลการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาในรูปแบบโครงสร้างสองตัวรวมกระแส ในภาวะปกติไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านและแมกนีโตทรานซิสเตอร์ได้รับการไบอัสโดยใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ในการกำหนดกระแสอินพุทอิมิตเตอร์  $I_E$  ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้งสอง โวลซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนมากในอิมิตเตอร์จะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ผ่านเบสไปคอลเลกเตอร์ดังแสดงรูปที่ 5.29 โดยที่โวลเคลื่อนที่ในทิศทาง  $x$  และทิศทาง  $-x$  แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา  $a$  พาหะ(โวล)เคลื่อนที่ในทิศทาง  $x$  โวลรวมตัวกับอิเล็กตรอน (recombination) ภายในเบสเป็นกระแสเบส  $I_{B(a)}$  และโวลบางส่วนจะเคลื่อนที่ผ่านเบสไปสะสมที่คอลเลกเตอร์เป็นกระแสคอลเลกเตอร์  $I_{C(a)}$  ซึ่งในภาวะปกติกระแสทั้งสองเท่ากันไม่เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสอง ( $\Delta I_{CB(a)}=0$ ) เช่นเดียวกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์  $b$  ซึ่งโวลเคลื่อนที่ในทิศทาง  $-x$  กระแสเบส  $I_{B(b)}$  เท่ากับกระแสคอลเลกเตอร์  $I_{C(b)}$  ไม่เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าทั้งสอง ( $\Delta I_{CB(b)}=0$ ) รูปที่ 5.29 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของโวลของแมกนีโตทรานซิสเตอร์  $a$  และ  $b$  ในรูปแบบโครงสร้างสองตัวรวมกระแส จากการทดลองในภาวะปกติค่าออฟเซตสามารถปรับเปลี่ยนให้เป็นศูนย์ได้โดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน  $R_C$  และ  $R_B$



รูปที่ 5.29 ทิศทางการเคลื่อนที่ของโซลภาวะปกติรูปแบบ โครงสร้างสองตัวรวมกระแส

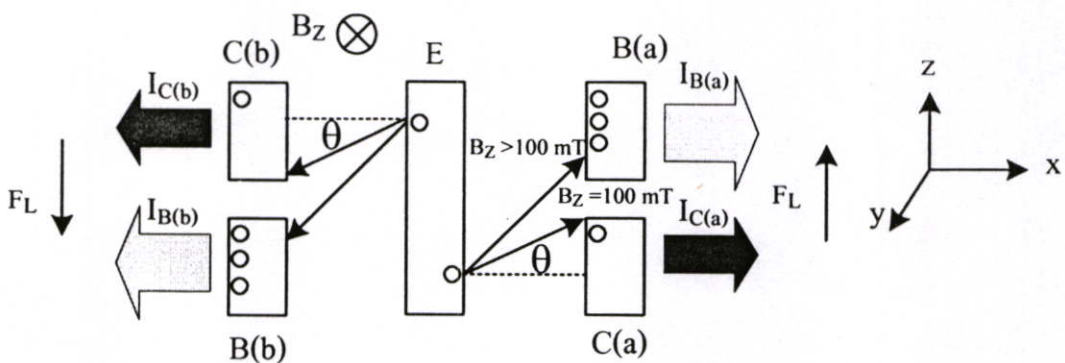
จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจาก 0 เป็น 100 mT นั่นคือมีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านตัวอุปกรณ์ ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง  $-y$  และ ทิศทาง  $y$  แรงลอเรนซ์กระทำกับโซลซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทาง  $x$  ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์  $a$  และ โซลซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทาง  $-x$  ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์  $b$  ทำให้โซลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์ เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB} \neq 0$ ) ค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  ของรูปแบบโครงสร้างสองตัวรวมกระแสจึงมากกว่าศูนย์สามารถวิเคราะห์การทำงานได้ดังรูปที่ 5.30

การนำโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสองตัวมาใช้ในการวัดผลตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง โดยในภาวะปกติแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้งสองไม่เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB(a)} = \Delta I_{CB(b)} = 0$ ) สนามแม่เหล็กแนวตั้งทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง  $-y$  และทิศทาง  $y$  เนื่องจากมีพาหะ(โซล)ที่เคลื่อนที่ในทิศทาง  $x$  และ  $-x$  แรงลอเรนซ์กระทำกับโซลทำให้เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์ ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์มีค่าประมาณสองเท่าของการวัดแบบปกติ ( $\Delta I_{CB(\text{merge})} = \Delta I_{CB(a)} + \Delta I_{CB(b)}$ ) จากผลการทดลองรูปที่ 5.28 การวัดในแบบโครงสร้างสองตัวรวมกระแสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถแสดงค่าเอาต์พุตเป็นสองเท่าเปรียบเทียบกับการวัดแบบตัวเดียว การรวมกันของกระแสเบส  $I_{B(a)}$  และ  $I_{B(b)}$  ที่เกิดจากโซลที่รวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสและโซลที่เบี่ยงเบนสะสมที่เบสทำให้กระแสเบสมีค่าสูงเปรียบเทียบกับกระแสคอลเลคเตอร์  $I_{C(a)}$  และ  $I_{C(b)}$  ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์จึงมีค่าสูง



รูปที่ 5.30 ทิศทางการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของโซลในการวัดสองตัวรวมกระแสโครงสร้าง

ในการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจาก 100 จนถึง 400 mT จากผลการทดลองรูปที่ 5.28 การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสามารถทำให้ค่าเอาท์พุทเพิ่มขึ้น ได้ดังที่อธิบายมาแล้ว แต่ในรูปแบบการวัดสองตัวรวมกระแสจะมีกระแสอินพุทอิมิตเตอร์สองทิศทางที่ตรงข้ามกัน โซลของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ a จะเคลื่อนที่ในมุมเบี่ยงเบนที่กว้างขึ้นในทิศทาง  $-y$  ซึ่งตรงข้ามกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ b โซลจะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในมุมที่กว้างขึ้นในทิศทาง  $y$  ดังแสดงรูปที่ 5.31

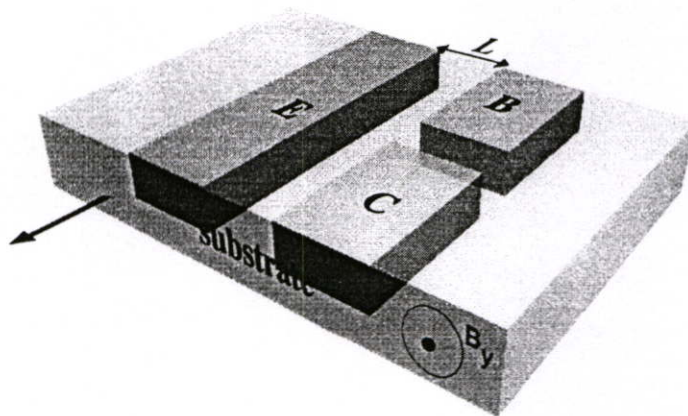


รูปที่ 5.31 การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับการเบี่ยงเบนของโซล

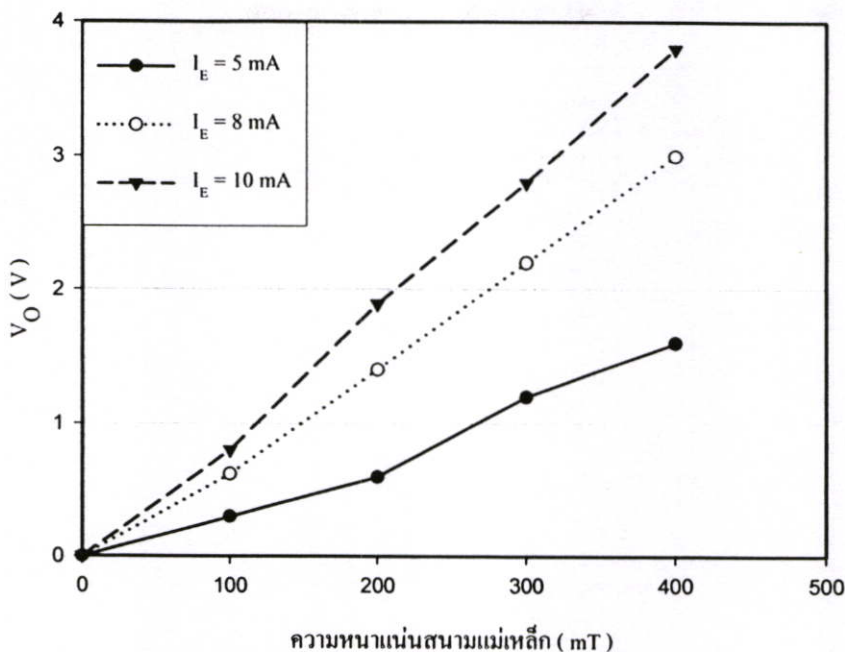
จากการทดลองการเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E$  จาก 5 mA เป็น 8 mA และ 10 mA ในการวัดสองตัวรวมกระแสผลการทดลองรูปที่ 5.28 กราฟที่ได้ของทุกรูปแบบโครงสร้างมีความชันมากขึ้นนั่นคือแสดงค่าเอาต์พุตที่วัดได้เพิ่มขึ้น โดยที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ 10 mA มีค่าเอาต์พุตที่สูงและมีความเชิงเส้นที่ดี การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์สามารถทำให้เอาต์พุตเพิ่มขึ้นได้ตามสมการที่ (2.38) คือ  $\Delta I_{CB} = J_{PY} \cdot W_E \cdot L \cdot \tan \theta_H$  เปรียบเทียบผลการทดลองรูปที่ 5.22

#### 5.4.5 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวอน

รูปที่ 5.32 แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กแนวอน ( $B_y$ ) ที่ตัดผ่านแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอนอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัว (recombination) ในเบสกับพาหะสะสมที่คอลเลกเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) กลไกในการเกิดความแตกต่างอาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตของอุปกรณ์กับกระแสการทำงานอิมิตเตอร์และความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ในการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวอนนั้นจะใช้วงจรวัดเช่นเดียวกับการวัดผลตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งและในการวิเคราะห์การทำงานสามารถใช้สมการของการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งมาอธิบายได้ รูปที่ 5.33 แสดงผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวอน ( $B_y$ ) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา โดยทำการทดลองที่ค่ากระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E = 5$  mA, 8 mA และ 10 mA เปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก 0-400 mT ใช้วงจรการวัดทดลองรูปที่ 5.20 กราฟที่ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุต  $V_o$  กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 5.32 ทิศทางของสนามแม่เหล็กแนวอน ( $B_y$ ) ที่ตัดผ่านแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

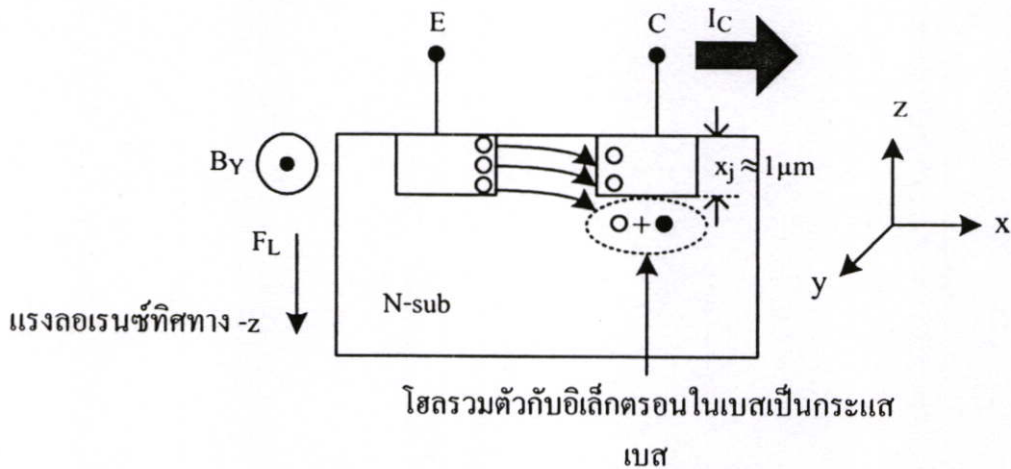


รูปที่ 5.33 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่กระแสการทำงาน อิมิตเตอร์ค่าต่างๆ

จากผลการทดลองรูปที่ 5.33 แสดงผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา ในภาวะปกติไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน ( $B_y = 0$ ) ค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_O$  ที่วัดได้เท่ากับศูนย์ โดยกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์เท่ากันไม่เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสอง ( $\Delta I_{CB} = 0$ ) การทำงานในภาวะปกติของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาดังอธิบายมาแล้วจากรูปที่ 5.23 จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจาก 0 เป็น 100 mT นั่นคือมีสนามแม่เหล็กแวนอนตัดผ่านตัวอุปกรณ์ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง  $-z$  แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ (โฮล) ซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทาง  $x$  ทำให้พาหะ (โฮล) เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์จึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสกับกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB} \neq 0$ ) ค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาจึงมากกว่าศูนย์ สามารถวิเคราะห์การทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาแสดงดังรูปที่ 5.34

จากการทดลองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนอนได้โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสกับกระแสคอลเลคเตอร์ กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากผลของการเบี่ยงเบนพาหะ(carrier deflection) โดยไม่มีผลของกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) สนามแม่เหล็กแวนอนทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง  $-z$  ซึ่งแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะที่เคลื่อนที่ในทิศทาง  $x$  โฮลจะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์และไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสกลายเป็น

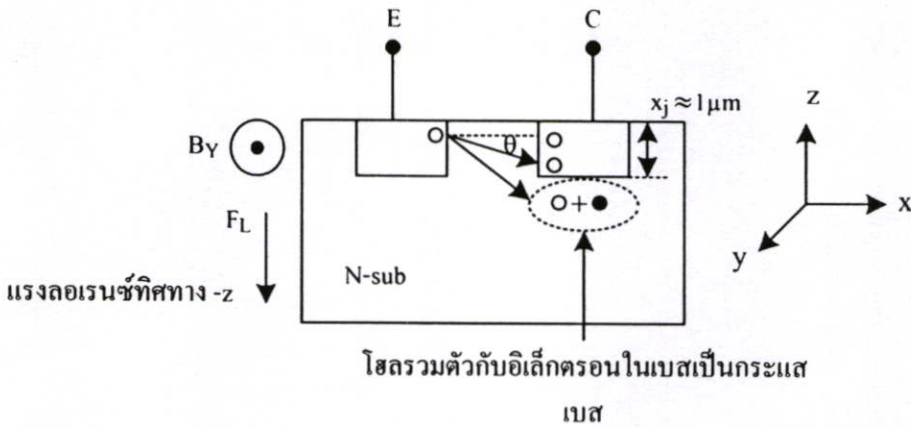
กระแสเบสโดยที่มีโฮลบางส่วนเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลกเตอร์จะกลายเป็นกระแสคอลเลกเตอร์ นั่นคือเกิดความไม่เท่ากันของกระแสทั้งสอง ( $\Delta I_{CB} \neq 0$ )



รูปที่ 5.34 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ(โฮล)เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทาง -Z

จากผลการทดลองรูปที่ 5.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเอาท์พุทกับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนอนจะมีความชันมากแสดงถึงค่าแรงดันเอาท์พุทที่วัดได้มีค่าสูง ซึ่งจากโครงสร้างอุปกรณ์ที่มีความลึกรอยต่อที่ตื้นทำให้กระแสเบสที่ได้จากโฮลที่รวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสมีค่ามากกว่ากระแสคอลเลกเตอร์ซึ่งเกิดจากพาหะเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลกเตอร์อย่างมาก ผลการวัดทดลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองรูปที่ 5.22 ค่าแรงดันเอาท์พุทที่วัดจากสนามแม่เหล็กแวนอนมีค่ามากกว่าผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแวนอนดั้ง วิเคราะห์ได้เนื่องจาก โฮลที่เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทาง  $-z$  สามารถไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนภายในเบสได้มากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างที่มีความลึกรอยต่อ ( $x_j$ ) ที่ตื้นทำให้โฮลเปลี่ยนแปลงมุมเบี่ยงเบนเพียงเล็กน้อยสามารถไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสเบสได้นั่นคือแรงดันเอาท์พุทที่วัดได้มีค่าสูงไปด้วย

การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 400 mT จากผลการทดลองรูปที่ 5.33 กราฟความสัมพันธ์ในแต่ละกระแสการทำงานอิมิตเตอร์จะมีความชันมากขึ้นแสดงถึงค่าแรงดันเอาท์พุท  $V_o$  เพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก โฮลถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ทำให้เคลื่อนที่ในมุมเบี่ยงเบนที่กว้างขึ้นตามทิศทาง  $-z$  เนื่องจากโครงสร้างที่มีความลึกของรอยต่อที่ตื้นมากทำให้การเปลี่ยนแปลงมุมเบี่ยงเบนของโฮลเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้ค่าแรงดันเอาท์พุทเปลี่ยนแปลงได้อย่างมากสามารถวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 5.35



รูปที่ 5.35 การเปลี่ยนแปลงมุมเบี่ยงเบนของ โพลตามทิศทาง -Z

จากการทดลองการเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E$  จาก 5 mA เป็น 8mA และ 10 mA ในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแวนอนสามารถทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  เพิ่มขึ้นได้นั้นคือแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของกระแสเบสเนื่องจากปริมาณ โพลที่รวมตัวกับอิลเล็กตรอนมากขึ้น และกระแสคอลเลคเตอร์เนื่องจากปริมาณ โพลเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลคเตอร์ ความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสองที่เพิ่มขึ้นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแวนอนสามารถวิเคราะห์ตามสมการเดียวกับการตอบสนองสนามแม่เหล็กแวนอนได้

#### 5.4.6 ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ( sensitivity )

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E = 5 \text{ mA}$ ,  $8 \text{ mA}$  และ  $10 \text{ mA}$  สามารถคำนวณค่าความไวตามสมการที่ (2.33)  $S_A = \Delta V / \Delta B_z$  จากผลการทดลองรูปที่ 5.22 การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์สามารถทำให้ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นได้ แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนอนได้โดยอาศัยกลไกความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ ( carrier deflection ) เพียงอย่างเดียว ค่าความไวที่ได้จากการคำนวณไม่ด้อยกว่าแมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขา

ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

$I_E$	$I_E = 5 \text{ mA}$	$I_E = 8 \text{ mA}$	$I_E = 10 \text{ mA}$
S (V/T)	0.04	0.15	0.4

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาในโครงสร้างสองตัวรวมกระแส ที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E = 5 \text{ mA}$ ,  $8 \text{ mA}$  และ  $10 \text{ mA}$  ในการวัดโหมคสองตัวรวมกระแสนั้นเป็นการแสดงทิศทางการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในสองทิศทางที่ตรงข้ามกัน ค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้มีค่าประมาณสองเท่าของการวัดแบบปกติโดยค่าเอาต์พุตในโหมคการวัดสองตัวรวมกระแสสามารถหาได้โดย

$$\Delta I_{CB(\text{merge})} = \Delta I_{CB(a)} + \Delta I_{CB(b)}$$

โดยที่

$$\Delta I_{CB(a)} = \Delta I_{CB(b)}$$

เพราะฉะนั้นค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในโหมคการวัดสองตัวรวมกระแสสามารถหาได้โดย

$$S_R = \frac{2\Delta I_C}{I_E \cdot \Delta B_z}$$

ตารางที่ 5.5 การเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง โครงสร้างสองตัวรวมกระแส

$I_E$	$I_E = 5 \text{ mA}$	$I_E = 8 \text{ mA}$	$I_E = 10 \text{ mA}$
S (V/T)	0.0775	0.345	1.05

จากการวัดทดลองค่าเอาต์พุตที่วัดได้อยู่ในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าสามารถคำนวณค่าความไวตามสมการที่ (2.30) ค่าความไวที่คำนวณของแมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างสองตัวรวมกระแสสามารถให้ค่าความไวได้ประมาณสองเท่าของการวัดแบบโครงสร้างปกติ การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์สามารถทำให้ค่าความไวเพิ่มขึ้นได้

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E = 5 \text{ mA}$ ,  $8 \text{ mA}$  และ  $10 \text{ mA}$  โดยสามารถคำนวณค่าความไวโดยสมการที่ (2.33) การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอนอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัวในเบสเป็นกระแสเบสและพาหะเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลกเตอร์เป็นกระแสคอลเลกเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) โดยไม่มีผลของกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) แรงลอเรนซ์เกิดในทิศทาง  $-z$  ทำให้พาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์สามารถวิเคราะห์จากการทำงานตามสมการเดียวกับการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งได้

ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบค่าความไวสัมบูรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

$I_E$	$I_E = 5 \text{ mA}$	$I_E = 8 \text{ mA}$	$I_E = 10 \text{ mA}$
S (V/T)	6.75	7.5	9.5

จากค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนอนตารางที่ 5.6 แสดงถึงค่าความไวที่สูงมากเปรียบเทียบกับ การตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนดิ่ง เนื่องจากโฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทาง  $-z$  ทำให้การเปลี่ยนแปลงมุมเบี่ยงเบนของโฮลเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้ค่าเอาต์พุตที่สูงมากวิเคราะห์จากโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่มีความลึกของรอยต่อคั่นมาก การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์สามารถทำให้ค่าความไวเพิ่มขึ้นได้เช่นเดียวกับการตอบสนองสนามแม่เหล็กแวนดิ่ง

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปงานวิจัยอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างเมกนีโตทรานซิสเตอร์ในรูปแบบห้าขาในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนดิงและรูปแบบสามขาในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนดิงและแวนอน ซึ่งเป็นการสรุปผลการทำงานและผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแวนดิงของเมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาในรูปแบบพารามิเตอร์ต่างๆ ผลของการเพิ่มขึ้นของแรงดันภายนอก  $V_A$  และกระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E$  ผลของการเปรียบเทียบความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแต่ละรูปแบบพารามิเตอร์ สรุปผลของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแวนดิงและแวนอนของเมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาในรูปแบบโครงสร้างปกติ และโครงสร้างสองตัวรวมกระแส ผลของการเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์และความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแวนดิงและแวนอน

1. เมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างห้าขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนดิงได้โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C$ ) กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection)

2. การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E$  แสดงถึงปริมาณการฉีดพาหะจากอิมิตเตอร์ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ปริมาณพาหะที่เบี่ยงเบนมากขึ้นนั่นคือความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นและเป็นผลให้ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูงขึ้นตามไปด้วย

3. การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าภายนอก  $V_A$  แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของการสะสมประจุพาหะที่แตกต่างกันในบริเวณด้านบนและด้านล่างของอุปกรณ์เป็นผลให้การฉีดพาหะบริเวณรอยต่อด้านบนและด้านล่างของอิมิตเตอร์มีความแตกต่างกันมากขึ้นจึงทำให้ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองมีค่ามากขึ้นนั่นคือทำให้ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นตามสมการ  $S = \Delta I_C / \Delta B$

4. เมกนีโตทรานซิสเตอร์ห้าขาที่พารามิเตอร์  $W = 20 \mu\text{m}$ ,  $L = 10 \mu\text{m}$  มีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูง และมีความเป็นเชิงเส้นดี ส่วนพารามิเตอร์  $W = 10 \mu\text{m}$ ,  $L = 20 \mu\text{m}$  มีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กค่อนข้างต่ำเช่นเดียวกับความเป็นเชิงเส้น

5. เมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างห้าขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนดิงได้ในโหมดการทำงานสามขาอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) ซึ่งเป็นการทดลองการทำงานเพื่อเป็นพื้นฐานในการออกแบบเมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

6. แมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างสามขารูปแบบโครงสร้างปกติและรูปแบบโครงสร้างสองตัวรวมกระแสสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งได้โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัวในเบส (recombination) เป็นกระแสเบสกับพาหะที่เบี่ยงเบนสะสมคอลเลคเตอร์เป็นกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) แต่ไม่มีผลของกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection)

7. การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์สามารถทำให้ค่าเอาท์พุทของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

8. การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงาน  $I_E$  มีผลให้ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นและไม่ทำให้ความเป็นเชิงเส้นลดลง

9. การทดลองแบบสองตัวรวมกระแสสามารถให้เอาท์พุท  $\Delta I_{CB}$  เป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับการทดลองแบบตัวเดียว

10. โครงสร้างที่ง่ายของไบโพลาร์แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาช่วยลดความยุ่งยากในการไบอัสและสามารถพัฒนาเพื่อใช้ในวงจรรวมได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] H. P. Baltes and R. S. Popovic, "Integrated semiconductor magnetic field sensors, " IEEE Trans. Electron Devices, vol. 74, p.1107, 1986.
- [2] H. Trujillo, A. Nagy and J.C. Cruz, "Influence of topology on the response of lateral magnetotransistor, " Sensors and Actuators A, 45 (1994) 179-182.
- [3] H. Trujillo, A. Nagy, P. Rodrigues and F. Rodrigues, "Merged lateral bipolar magnetotransistor, " Sensors and Actuators A, 50 (1995) 177-181.
- [4] L. Ristic, T. Smy and Henry P. Baltes, "A Lateral Magnetotransistor Structure with a Linear Response to the Magnetic field, " IEEE Trans. Electron Devices, vol.36, NO 6, 1989.
- [5] Henry P. Baltes, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor," IEEE Trans. Electron Devices, vol.74, pp.315-317, no.8, 1986.
- [6] T. Nakamura and K. Maenaka, "Integrated Magnetic Sensor," Sensors and Actuators, vol.35, pp.21-23, 1990.
- [7] ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์, โสภณ พรหมชัย, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, "ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26, เดือน พฤศจิกายน ปี 2546, หน้า 1419-1424
- [8] Toempong Phetchakul, Weera Pengchan, Chana Leepattarapongpan, "Three Terminals Magnetotransistor Sensing by Difference of Base and Collector Current," International Conference on Materials for Advance Technologies, Singapore, July 3-8, 2005.
- [9] Agnes Nagy and Hector Trujillo, "3D magnetic-field sensor using only a pair of terminals, " Sensors and Actuators A, 58 (1997) 137-140.
- [10] ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์, วีระเพ็ญจันทร์, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, "แมกนีโตทรานซิสเตอร์โหมดการทำงานสามขั้ว", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 27, เดือน พฤศจิกายน ปี 2547, หน้า 273-276
- [11] ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์, วีระ เพ็ญจันทร์, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, "ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28, เดือน ตุลาคม ปี 2548, หน้า 1225-1228
- [12] T. Smy and Lj. Ristic, "Optimization of Magnetotransistor Structure in CMOS Technology," IEEE Transactions on MAGNETICS, vol.28, NO.5, SEPTEMBER 1992.
- [13] L. Ristic (ed), **Sensor Technology and Devices**, Artech House, Norwood, 1994, Ch. 7, pp. 239-285.

- [14] S. Middelhoek and S.A. Audet, **Silicon Sensors**, Academic Press, London, 1989, Ch. 5, pp. 201-244.
- [15] Julian W. Gardner, **Microsensors Principles and Application**, John Wiled & Sons, Chichester, 1994, Ch. 8, pp. 199-220.
- [16] Toempong Phetchakul, Chana Leepattarapongpan Weera Pengchan, "**Magnetotransistor Sensing by the Difference of Base and Collector Current**," International Symposium on Integrated Circuits, Singapore, September 8-10, 2004.
- [17] Agnes Nagy and Hector Trujillo, "**Highly sensitive magnetotransistor with new topology**," Sensors and Actuators A, 65 (1998) 97-100.
- [18] O. Neagoe, M. Avram, C. Ravariu, "**The Efficiency Increase for Integrated Lateral Dual Collector Magnetotransistor**," IEEE Sensors Journal, (1998) 289-291.
- [19] M. Avram, O. Neagoe, C. Codreanu, C. Voitincu, M. Simion, "**An Optimised Bipolar Lateral Magnetotransistor**," IEEE Sensors Journal, (1998) 83-86.
- [20] Boll. R and Overshott KT (1998) **Sensors: A Comprehensive Survey**, vol. 5: **Magnetic Sensors** ( eds.w.Gopel, J. Hesse and J.N.Zemel), VCH Publishers In, Germany, 513 pp.
- [21] รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช, "เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์" แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542

ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก.**

**คุณสมบัติทั่วไปของซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์**

## 1. คุณสมบัติทั่วไปของซิลิคอน

<b>Properties of Si at 300 K</b>	
<b>Properties</b>	<b>Si</b>
Atoms/cm <sup>3</sup>	$5.0 \times 10^{22}$
Atomic weight	28.09
Breakdown field, V/cm	$\sim 3 \times 10^5$
Crystal Structure	Diamond
Density, g/cm <sup>3</sup>	2.328
Distance between neighboring atoms, nm	0.2328
Effective density of states	
Valence band, cm <sup>3</sup>	$1.04 \times 10^{19}$
Conduction band, cm <sup>-3</sup>	$2.8 \times 10^{19}$
Effective mass, m <sup>*</sup> /m <sub>0</sub>	
Electron	$m_{e}^* = 0.98$
	$m_{c}^* = 0.19$
Holes	$m_{lh}^* = 0.16$
	$m_{hh}^* = 0.49$
Electron affinity, V	4.05
Energy gap, eV	1.12
Index of refraction	3.42
Intrinsic carrier concentration, cm <sup>-3</sup>	$1.45 \times 10^{10}$
Intrinsic Debye length, $\mu\text{m}$	24
Intrinsic resistivity, W-cm	$2.3 \times 10^5$
Lattice constant, nm	0.5431
Linear coefficient of thermal expansion, cm/(cm-K)	$2.6 \times 10^{-6}$
Melting point, °C	1415
Minority-carrier lifetime, s	$2.5 \times 10^{-3}$
Mobility, cm <sup>2</sup> /(V.s)	

Properties	Si
Electron	1500
Holes	475
Optical phonon energy, eV	0.063
Phonon mean free path, nm	7.6 (electron) 5.5 (hole)
Poisson's ratio	0.42
Relative permittivity	11.9
Specific heat, J/(g.K)	0.7
Thermal conductivity, W/(cm.K)	1.5
Thermal diffusivity, cm <sup>2</sup> /s	0.9
vapor pressure, Pa	1 at 1659 °C 10 <sup>-6</sup> at 900°C
Young's modulus, g/cm	1.089×10 <sup>9</sup>

## 2. คุณสมบัติทั่วไปของซิลิกอนไดออกไซด์

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

## ภาคผนวก ข.

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Toempong Phetchakul, Weera Pengchan, Chana Leepattarapongpan, "Three Terminals Magnetotransistor Sensing by Difference of Base and Collector Current," International Conference on Materials for Advance Technologies (ICMAT 2005), Singapore, July 3-8, 2005.
2. ชนะ สลักทรพงศ์พันธ์, โสภณ พรหมชัย, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, "ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26, เดือน พฤศจิกายน ปี 2546, หน้า 1419-1424
3. ชนะ สลักทรพงศ์พันธ์, วีระเพ็ญจันทร์, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, "แมกนีโตทรานซิสเตอร์โหมดการทำงานสามขั้ว", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 27, เดือน พฤศจิกายน ปี 2547, หน้า 273-276
4. ชนะ สลักทรพงศ์พันธ์, วีระ เพ็ญจันทร์, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, "ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28, เดือน ตุลาคม ปี 2548, หน้า 1225-1228

ABSTRACTS  
Symposium D  
Magnetic Nanomaterials and Devices



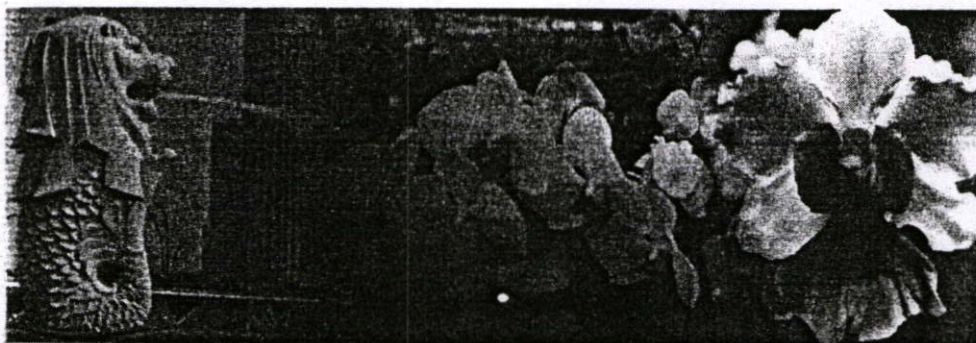
ICMAT  
2005

3<sup>rd</sup> International Conference on  
Materials for Advanced Technologies  
(ICMAT 2005)

AND



9<sup>th</sup> International Conference on  
Advanced Materials  
(ICAM 2005)



3-8 July 2005, Singapore

[www.mrs.org.sg](http://www.mrs.org.sg)

Organised by

MRS  
Materials Research Society  
SINGAPORE



NUS  
National University  
of Singapore



Institute of  
Materials Research  
and Engineering



NANYANG  
TECHNOLOGICAL  
UNIVERSITY



## Three Terminals Magnetotransistor Sensing by the Difference of Base and Collector Current

Toempong Phetchakul, Weera Pengchan, Chana Leepattarapongpan  
*Electronics Research Center, Department of Electronics, Faculty of Engineering  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand*

### Abstract

This paper introduces a bipolar magnetotransistor for a vertical magnetic field, which consists of three terminals including; collector, emitter and base. The Lorentz force affects directly to the deflection of minority carriers in base. Also it affects in the difference between collector and base current, which relates to magnetic field and emitter current. This pattern indicates the topology development of bipolar magnetotransistor to be the discrete device with three terminals to apply for the sensitivity increment.

*Keyword:* Bipolar magnetotransistor; Magnetic sensors

### 1. Introduction

The bipolar magnetotransistor is one of semiconductor magnetic field sensors, which has the micro structure, high sensitive value and low output noise. Beside, it is able to co-function with integrated circuit and applicable to various advantages.

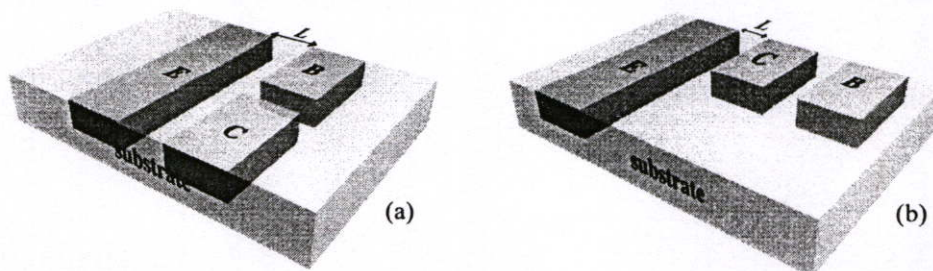
The bipolar magnetotransistors sensing magnetic field can be divided into two major groups. Bipolar magnetotransistors depend on the vertically flowing carriers for their magnetic operations are known as vertical magnetotransistors. Conversely, if the lateral flow of injected carriers is responsible for the magnetic response, the devices are known as lateral magneto transistors. Normally, the bipolar magnetotransistor structure consists of two collectors, single emitter and two base contacts [4].

The operation of bipolar magnetotransistors bases on the carriers deflection by the Lorentz force. This force performs imbalance on both collectors current. While, base contact is designed as the external compound to support electric field to carriers. Two major operating principles, such as carrier deflection and emitter injection modulation, are reported [1-5].

This paper presents the detection of three terminals bipolar magnetotransistors in z- direction magnetic field. The sensing mechanism is the difference between collector current ( $I_C$ ) and base current ( $I_B$ ). This bipolar magnetotransistor is not only used easily as the simple one but also decreases complicated bias and develops into the discrete device.

### 2. Device structures and operation principle

The layouts of four bipolar magnetotransistor patterns are shown in Figure 1. The devices are lateral bipolar magnetotransistor, consists of single emitter, collector and base.



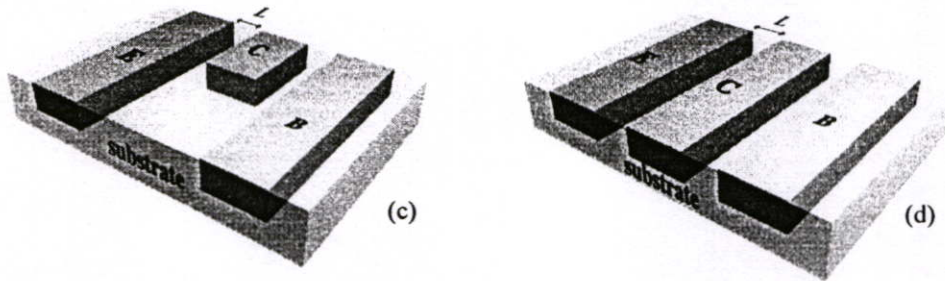


Figure 1. Four bipolar transistor layout patterns with emitter E, collector C and base B; (a) MT A, (b) MT B, (c) MT C and (d) MT D.

The device structures were fabricated in a standard bipolar technology. The substrate was n-type (100) of 2-4  $\Omega$ -cm resistivity and thickness of approximately 400  $\mu\text{m}$ . The base region was phosphorus diffused with a concentration  $N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . The following high-temperature drive in (1000  $^\circ\text{C}$ ) substrate 1  $\mu\text{m}$  in depth. The collector and emitter were boron diffused with a concentration  $N_A = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  and base width  $W_B = 20 \mu\text{m}$ . The photographs of the bipolar transistor structures are shown in Figure 2.

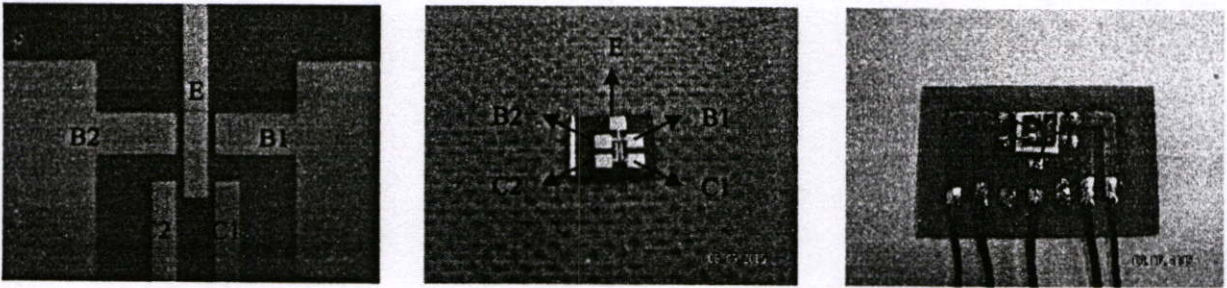


Figure 2. The photographs of the bipolar transistor in A-pattern.

The device operation is as follows. In the forward active, the holes are injected from the emitter pass bases into the collector, and then split into two lateral components collected by base and collector. In the absence of a magnetic field, the base current and the collector current are equal. When the magnetic field perpendicular to the surface (in z-direction), Lorentz force will be occurred then the carriers will deflect to cause different base current and emitter current. The Lorentz force can be found from Eq.(1).

$$F_L = q \cdot v \times B_z \quad (1)$$

where  $v$  is the drift velocity,  $B_z$  is the magnetic field density in z-direction.

The total collected current in base and collector, are emitter current ( $I_E = I_B + I_C$ ), which can be expressed in terms of laterally flowing hole  $J_{py}$  defined by Eq.(2).

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

where  $W_E$  is the emitter width and  $d$  is the junction depth.

The current imbalance is related to base width  $L$ , hole mobility  $\mu_p$  and magnetic field density  $B_z$ . The lateral current flowing will be deflected in angle  $\Theta_H$ , which is defined by  $\tan \Theta_H = \mu_p \cdot B_z$ . The alteration of base current and collector current are defined as Eq.(3), can be calculated by the current density  $J_{py}$  in the plane  $L = W_B$ , emitter width  $W_E$  and deviated angle  $\tan \Theta_H$ .

$$\Delta I_{CB} = J_{py} \cdot W_E \cdot W_B \cdot \tan \Theta_H \quad (3)$$

Defining the relative sensitivity as

$$S_R = \frac{\Delta I_{CB}}{I_E \cdot B_Z} \tag{4}$$

or

$$S_R = \frac{L \cdot \mu_p}{d} \tag{5}$$

### 3. Experimental and Results

The responsive measure-circuit shown in Figure 3 affects the parasitic coupling reduction [2]. A constant emitter current  $I_E$  flows into the emitter E, whereas the alteration of currents,  $I_B$  and  $I_C$ , is measured as a response to magnetic field.

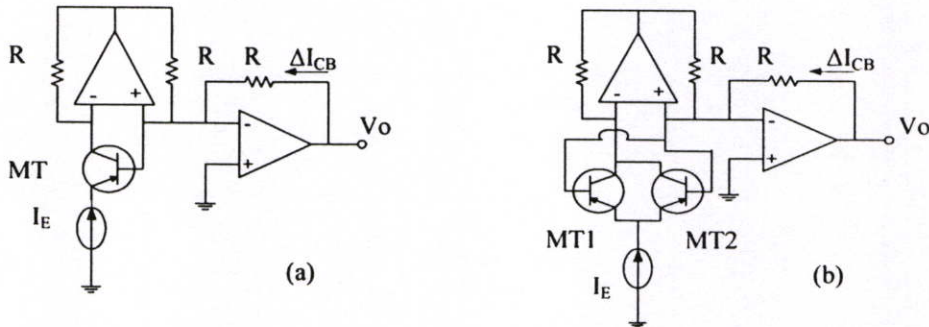


Figure 3. The responsive measure-circuit; (a) individual connection and (b) merge connection.

In Figure 4(a), it is comparison of the  $B_Z$ -response in each pattern (shown in Figure 1). The emitter connected to current source by constant emitter current  $I_E = 10 \text{ mA}$  while the magnetic field was adjusted between 100-400 mT by measured output in the  $\Delta I_{CB}$  form. According to Figure 4(b), it demonstrates the relation of  $\Delta I_{CB}$  to  $B_Z$  by the merge connection. The merge-measurement is the combination of two bipolar magnetotransistor output, which has similar structure but opposite deflective direction. So  $\Delta I_{CB}$  is equivalent to  $[(I_{B1} + I_{B2}) - (I_{C1} + I_{C2})]$ .

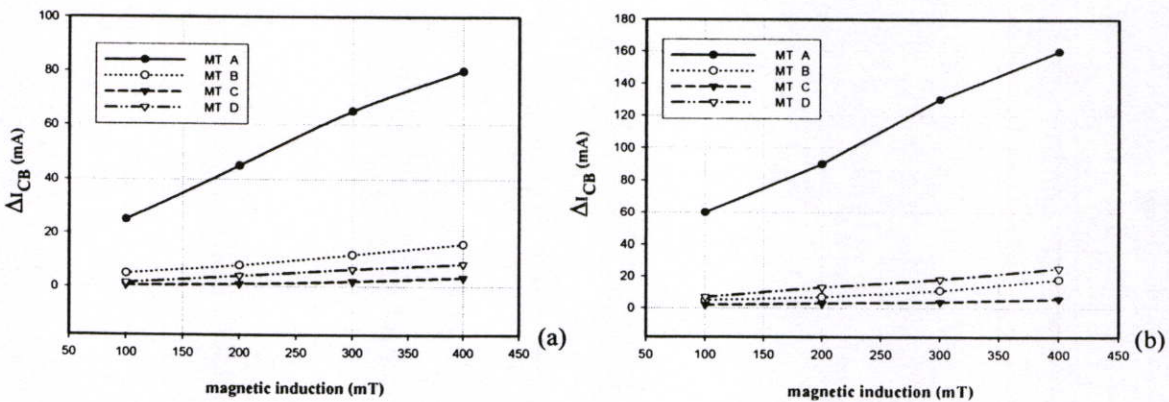


Figure 4.  $B_Z$ -magnetic field responsive result of (a) individual and (b) merge connection.

Table 1 present the sensitivity of each pattern in Figure 1 and the comparison of sensitivity between individual and merge bipolar magnetotransistor.

Table 1 the comparison of sensitivity between individual and merge connection.

MT	A		B		C		D	
connection	ind	merge	ind	merge	ind	merge	ind	merge
$S_R(T^{-1})$	20	40	2.375	4.5	0.875	1.5	2.125	5.385

#### 4. Discussion

The result in Figure 4, is the comparison of z-direction magnetic field response in each pattern. As a result of change in  $B_z$  magnetic field increase,  $\Delta I_{CB}$  is raised as the indicator of the bipolar magnetotransistor sensitivity. MT A has highest sensitive ability. The increasing of magnetic field affects on the elevated base current, whereas collector current is declined. As a result, the more difference between base and collector currents, the more sensitivity of magnetic field. The deviated direction of carriers is one of reasons that cause MT B, MT C and MT D structure produce low output. Due to the collected deviated carriers in collector, collector current is higher than base current from recombination of carriers. Because of the very wide base width, the base current has not difference significantly from collector current.

The experimental results in Figure 4(b) show the higher  $\Delta I_{CB}$  value of all patterns than the individual measurement, which present the double increase in sensitivity, analyzed by Eq.(6)-Eq.(8), where (a) and (b) are the same bipolar magnetotransistor pattern but different deviated direction of carrier.

$$\Delta I_{CB(merge)} = \Delta I_{CB(a)} + \Delta I_{CB(b)} \quad (6)$$

$$\Delta I_{CB(a)} = \Delta I_{CB(b)} \quad (7)$$

$$S_{R(merge)} = \frac{2\Delta I_{CB(ind)}}{I_E \cdot B_z} \quad (8)$$

#### 5. Conclusions

The bipolar magnetotransistor of all patterns can be able to detect magnetic field, depend on the difference between collector and base current. The merge measurement has the higher efficiency to increase sensitivity, compares with the individual measurement. According to the simple structure of bipolar magnetotransistor, it decreases the complexity of bias and be applicable for discrete device development.

#### 6. Acknowledgment

The author would like to thank faculty of engineering for financial support.

#### Reference

- [1] H. Trujillo, A. Nagy and J.C. Cruz, Influence of topology on the response of lateral magnetotransistor, *Sensors and Actuators A*, 45 (1994) 179-182
- [2] H. Trujillo, A. Nagy, P. Rodrigues and F. Rodrigues, Merged lateral bipolar magnetotransistor, *Sensors and Actuators A*, 50 (1995) 177-181
- [3] L. Ristic, T. Smy and Henry P. Baltes, A Lateral Magnetotransistor Structure with a Linear Response to the Magnetic field, *IEEE Trans Electron Devices*, vol.36, NO 6, 1989.
- [4] Henry P. Baltes, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor," *IEEE Trenton Electron Devices*, vol.74, pp.315-317, no.8, 1986
- [5] T. Nakamura and K. Maenaka, "Integrated Magnetic Sensor," *Sensors and Actuators*, vol.35, pp.21-23, 1990

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๐  
36th Electrical Engineering Conference



NECTEC

Seagate  
We turn on ideas

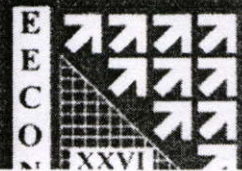
ABB

AIS

Volume III  
สาขานวัตกรรม  
อิเล็กทรอนิกส์ (EL)  
ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)



6-7 พฤศจิกายน 2546  
โรงแรมโกลเด้นแลนด์ สระบุรี จ.เพชรบุรี  
สำนักงานประชุมไทย  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และภาควิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะวิศวกรรม



# ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง

## Vertical Magnetic Field Bipolar Transistor

ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์, โสภณ พรหมชัย, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร.0-2739-0643 โทรสาร.0-2739-2384

### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอถึงอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง โดยใช้โครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และอาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ รอยต่ออิมิตเตอร์-เบสได้รับแรงดันไปข้างหน้าพาหะถูกฉีดเข้าไปในเบสที่มีสนามไฟฟ้าและเคลื่อนที่ด้วยการแพร่และครีพท์ไปยังคอลเลกเตอร์ซึ่งแยกกันอยู่ 2 ขั้วอย่างสมมาตร สนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากแนวตั้งทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะทำให้เกิดความแตกต่างของกระแสคอลเลกเตอร์ ( $\Delta I_C$ ) จากการทดลอง  $\Delta I_C$  มีความสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างคอลเลกเตอร์ (W) และระยะห่างระหว่างอิมิตเตอร์กับคอลเลกเตอร์ (L) ที่ไบอัสเบส 5 โวลต์, กระแส  $I_E = 100\mu A$ ,  $W = 10\mu m$ ,  $L = 20\mu m$  วัดค่าความไวได้  $218.62mV/T$  มีความเป็นเชิงเส้นดีมาก

### Abstract

This paper presents vertical magnetic field detector by using bipolar transistor structure and Hall effect. The emitter-base forward junction injects carrier into base region that has electric field from external biasing. The carrier drift and diffuse to the separated two symmetry collectors. When vertical magnetic field perpendicular to the devices, Lorentz force act upon carriers cause the difference of collector current  $\Delta I_C$ . After condition base biasing 5V,  $I_E = 100\mu A$ ,  $W = 10\mu m$ ,  $L = 20\mu m$ , the sensitivity is  $218.62mV/T$  and the linearity is good.

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กมีหลายชนิดเช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ มอสเฟต เป็นต้น [1] โดยอุปกรณ์เหล่านี้อาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างประจุพาหะและความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก [1-3] ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีบทบาทและถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีอัตราเร็วใน

การทำงานและให้เอาต์พุตมีค่าสูง ซึ่งสามารถนำมาเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้

บทความนี้ศึกษาถึงไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยมีเบส 2 ขั้วเพื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าและมีคอลเลกเตอร์ 2 ขั้ว [4-5] เพื่อคุณผลการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเลกเตอร์ โดยทิศทางของกระแสไหลตามแนวอนครวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก ซึ่งสามารถศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับความแตกต่างของกระแสคอลเลกเตอร์ โดยเปลี่ยนแปลงระยะของคอลเลกเตอร์ทั้งสอง (W) และระยะระหว่างอิมิตเตอร์กับคอลเลกเตอร์ (L) เพื่อคุณผลของเอาต์พุตและความไวของอุปกรณ์ ซึ่งสามารถนำข้อมูลไปพัฒนาในการสร้างเป็นวงจรรวม (Integrated Circuit) ต่อไป

### 2. หลักการทำงานและการออกแบบ

ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เมื่ออิมิตเตอร์และเบสไบอัสไปข้างหน้า พาหะส่วนมาก (majority carrier) จากอิมิตเตอร์ถูกฉีดเข้าไปในเบสข้ามเบสไปยังคอลเลกเตอร์ เพื่อให้เกิดผลของแรงกระทำต่อพาหะออกแบให้เบสมีความขวามากกว่าปกติและใช้สนามไฟฟ้าในเบสช่วยพาหะในการเคลื่อนที่จากเบสไปยังคอลเลกเตอร์ ทำให้เกิดกระแสคอลเลกเตอร์ เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านความหนาแน่นของพาหะที่คอลเลกเตอร์ทั้งสองมีปริมาณเท่ากัน กระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสองเท่ากัน ( $\Delta I_C = 0$ ) นั่นคืออยู่ในภาวะสมดุล เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสคอลเลกเตอร์ เกิดแรงลอเรนซ์ซึ่งกระทำกับประจุพาหะ ทำให้พาหะส่วนน้อยในเบสเบี่ยงเบนความหนาแน่นของประจุพาหะที่คอลเลกเตอร์ทั้งสองไม่เท่ากัน เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C \neq 0$ ) นั่นคือเปลี่ยนแปลงจากภาวะสมดุลเป็นไม่สมดุล  $\Delta I_C$  นี้คือความแตกต่างของ  $I_{C1}$  และ  $I_{C2}$  ดังสมการที่ (2) เพราะฉะนั้นผลรวมของ  $I_{C1}$  และ  $I_{C2}$  ก็คือ  $I_C$  ที่ไหลในภาวะปกตินั้นเองดังสมการที่ (1) ส่วนสมการที่ (3) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta I_C$  กับสนามแม่เหล็ก ซึ่ง  $\Delta I_C$  แปรผันตามความเข้มสนามแม่เหล็กและ  $\Delta I_C$  แปรผันตามกระแสอิมิตเตอร์เช่นเดียวกัน

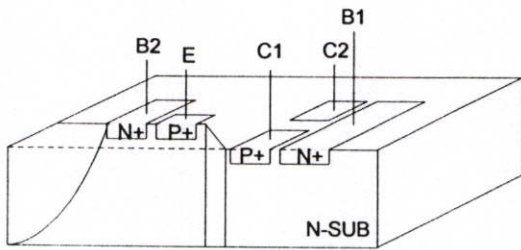
$$I_C = I_{C1} + I_{C2} \quad (1)$$

$$\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2} \quad (2)$$

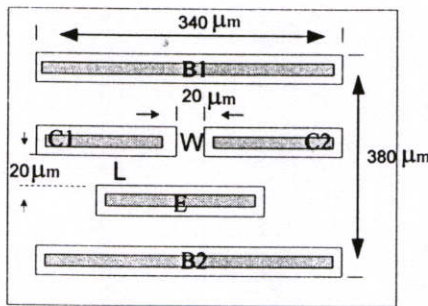
$$\Delta I_C = K_g (\mu_p + \mu_n) B_x I_i \quad (3)$$

โดยที่  $K_g$  คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของตัวอุปกรณ์  
 $\mu_p, \mu_n$  คือ ค่าความคล่องตัวในการไหลของโฮลและอิเล็กตรอน

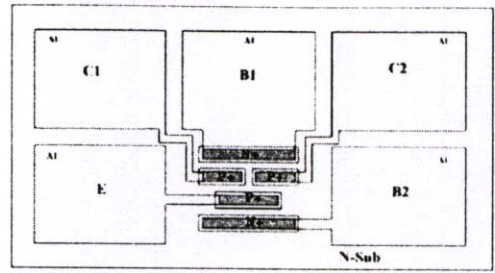
จากหลักการดังกล่าวโครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 1 โดยรูปที่ 1 (ก) เป็นภาพโครงสร้างด้านตัดขวางของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิด P-N-P คอลเลคเตอร์ทั้งสองมีขนาดสมมาตรกันและแยกออกจากกันซึ่งสร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิด P' อิมิตเตอร์สร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิด P' โดยมีความยาวคาบเกี่ยวระหว่างชั้นสารคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ส่วนของหัวเบสสร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิด N' แบ่งเป็นสองขั้ว ซึ่งจะอยู่ด้านนอกสุดของตัวอุปกรณ์และครอบคลุมทั้งอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ ทั้งหมดสร้างบนฐานรองชนิด N



(ก) ภาพตัดขวาง โครงสร้าง



(ข) ภาพด้านบนแสดงมิติของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์



(ค) ภาพโครงสร้างของหัวอะลูมิเนียม

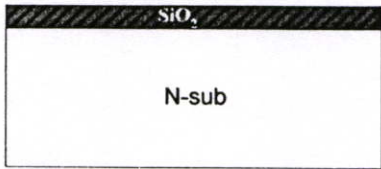
รูปที่ 1 โครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

รูปที่ 1 (ข) แสดงให้เห็นถึงมิติของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ โดยขาอิมิตเตอร์จะมีความยาวที่คาบเกี่ยวระหว่างชั้นสารคอลเลคเตอร์ C1 และ C2 ที่ขาคอลเลคเตอร์ C1 และขาคอลเลคเตอร์ C2 มีขนาดเท่ากันและแยกออกจากกัน ระยะห่างระหว่างคอลเลคเตอร์ C1 และ C2 มีผลต่อการเบี่ยงเบนกระแสคอลเลคเตอร์ ถ้ามากเกินไปอาจไม่เห็นความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ C1 และ C2 ซึ่งอาจต้องใช้ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงจึงเห็นความแตกต่าง ส่วนระยะห่างระหว่างชั้นสารอิมิตเตอร์กับชั้นสารคอลเลคเตอร์ มีผลกับประสิทธิภาพการฉีดพาหะเนื่องจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์นี้มีระยะห่างระหว่างอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์มาก พาหะอาจถูกฉีดไปไม่ถึงคอลเลคเตอร์จึงต้องเพิ่มสนามไฟฟ้าเพื่อช่วยในการฉีดพาหะโดยการไบอัสที่ขาเบส B2, B1 ขั้วเบสต้องให้มีความยาวครอบคลุมทั้งชั้นสารอิมิตเตอร์และชั้นสารคอลเลคเตอร์โดยตำแหน่ง B2, B1 อยู่ด้านนอกสุดเพื่อให้สนามไฟฟ้าที่ได้จากการไบอัสครอบคลุมทุกชั้นสารของอุปกรณ์ ซึ่งในการออกแบบมีค่า  $W$  และ  $L$  ดังนี้ พารามิเตอร์ที่ 1  $W=20\mu\text{m}$   $L=20\mu\text{m}$  พารามิเตอร์ที่ 2  $W=10\mu\text{m}$   $L=20\mu\text{m}$  พารามิเตอร์ที่ 3  $W=20\mu\text{m}$   $L=10\mu\text{m}$  พารามิเตอร์ที่ 4  $W=10\mu\text{m}$   $L=10\mu\text{m}$  รูปที่ 1 (ค) แสดงภาพของหัวอะลูมิเนียมสำหรับต่อวัดทดสอบอุปกรณ์ ควรให้มีขนาดใหญ่ที่สุดเพื่อความสะดวกในการวัด

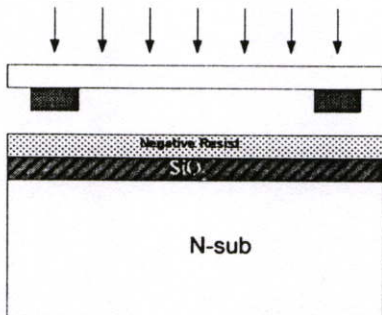
### 3.กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เริ่มจากการนำแผ่นซิลิคอนชนิด N หนา 100 ค่าสภาพความต้านทาน 2-4  $\Omega\text{-cm}$  ความหนา 400  $\mu\text{m}$  สร้างซิลิคอนไดออกไซด์ โดยกระบวนการอ็อกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1100 °C ในเวลา 5 ชั่วโมงได้  $\text{SiO}_2$  หนาประมาณ 5000  $\text{\AA}$  ได้ดังรูปที่ 2 (ก) ใช้กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี และทำการแพร่สารเจือ (Diffusion) ชนิด N' ด้วย  $\text{POCl}_3$  Deposition ที่อุณหภูมิ 1000 °C เวลา 45 นาทีในบรรยากาศของไนโตรเจนและ Drive in ที่อุณหภูมิ 1100 °C เวลา 40 นาทีในบรรยากาศของอ็อกซิเจน ดังรูปที่ 2

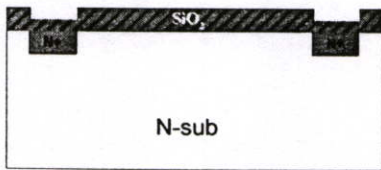
(ข) - (ค) กระบวนการโฟลิด์โทกราฟีและ ทำการแพร่สารเจือชนิด P' ด้วย B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Deposition ที่อุณหภูมิ 900 °C ในบรรยากาศของ ออกซิเจนเวลา 30 นาทีและในบรรยากาศไนโตรเจนเวลา 50 นาที Drive in ที่อุณหภูมิ 1100 °C ในบรรยากาศออกซิเจนเวลา 40 นาที ได้ส่วนอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์ ดังรูปที่ 2 (ง) กระบวนการโฟลิด์โทกราฟีเพื่อทำการสร้างคอนแทค เคลือบชั้นอะลูมิเนียมโดยกระบวนการ Evaporation ที่ความดัน 2.5x10<sup>-6</sup> Torr ในบรรยากาศสุญญากาศ และ กระบวนการโฟลิด์โทกราฟีเพื่อสร้างลวดลายอะลูมิเนียม แล้วทำการ Sintering ที่อุณหภูมิ 500 °C ในบรรยากาศไนโตรเจนเวลา 12 นาทีเพื่อ ทำให้เกิดรอยต่อโอห์มิก ชั้นคอนกระบวนการสร้างดังรูปที่ 2 (ก) - (จ) สำหรับ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 3



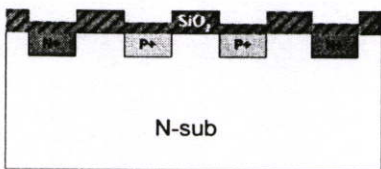
(ก)



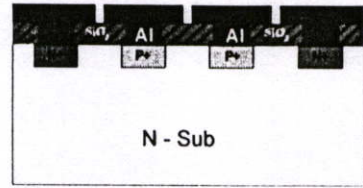
(ข)



(ค)

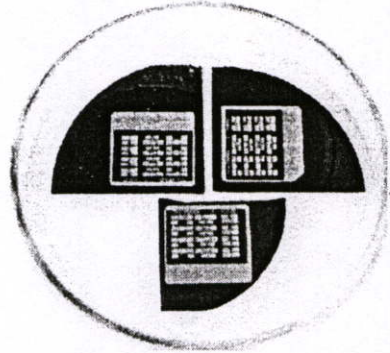


(ง)



(จ)

รูปที่2 ชั้นคอนกระบวนการสร้าง

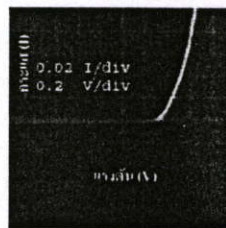


รูปที่3 ภาพถ่ายไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์

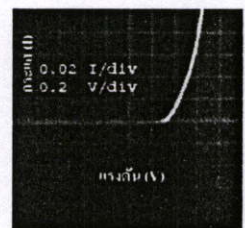
4. การทดลองและผลการทดลอง

4.1 คุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นใน โครงสร้าง ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

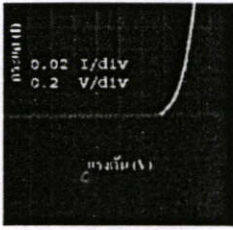
การวิเคราะห์รอยต่อพี-เอ็น เป็นการเช็คคุณสมบัติของรอยต่อว่าเป็นรอยต่อที่สมบูรณ์หรือไม่ จากกราฟเห็นว่าถ้าเป็นรอยต่อพี-เอ็นที่สมบูรณ์กราฟมีลักษณะเหมือนกับไดโอดที่ได้รับไบอัสไปข้างหน้า ผลการทดลองที่ได้เห็นว่ากราฟแต่ละรูปมีคัทอิน โวลเตจไม่เท่ากันซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่มีฝุ่นละอองเกาะอยู่ที่ตัวอุปกรณ์ในชั้นคอนกระบวนการสร้างทำให้ค่าความต้านทานในส่วนของเนื้อสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนไป อย่างไรก็ตามทุกๆรอยต่อในไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์มีคุณสมบัติในการเรกติไฟร์หรือมีคุณสมบัติความเป็นไดโอดนั่นเอง



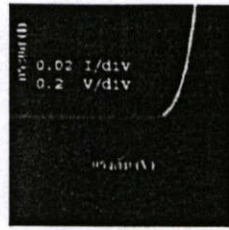
(ก) B1-C1



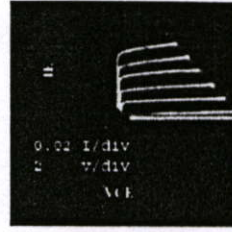
(ข) B2-C1



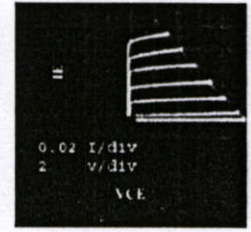
(ก) B1-C2



(ข) B2-C2



(ค) รอยต่อ B2-C1-E



(ง) รอยต่อ B2-C2-E



(จ) B1-E

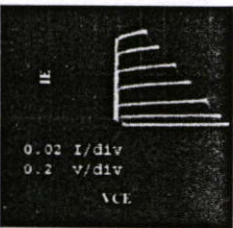


(ฉ) B2-E

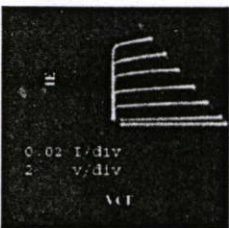
รูปที่ 4 คุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นในโครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

4.2 การวัดคุณสมบัติไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

การวัดคุณสมบัติไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ด้วยเครื่องวัด Curve Tracer ซึ่งเป็นกรทดสอบว่าตัวอุปกรณ์มีคุณสมบัติเป็นไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์หรือไม่ ผลการวัดที่ได้ดังรูปที่ 5 โดยรูปที่ 5 (ก) วัดขา B1-C1-E ซึ่งผลจากกราฟแสดงว่าที่ B1-C1-E มีคุณสมบัติความเป็นไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เช่นเดียวกับรูปที่ 5 (ข)-(ง) แสดงคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ที่ข้ออื่นๆ ถึงแม้โครงสร้างมีเบสที่มีความขามากกว่าปกติ ก็ยังสามารถทำงานเป็นไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ได้



(ก) รอยต่อ B1-C1-E

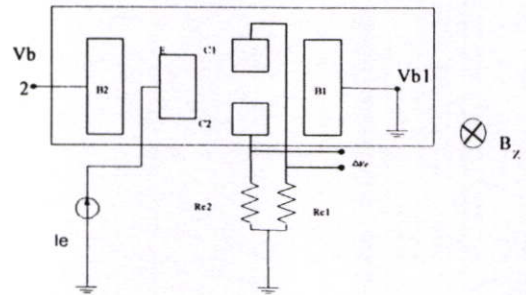


(ข) รอยต่อ B1-C2-E

รูปที่ 5 คุณสมบัติไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

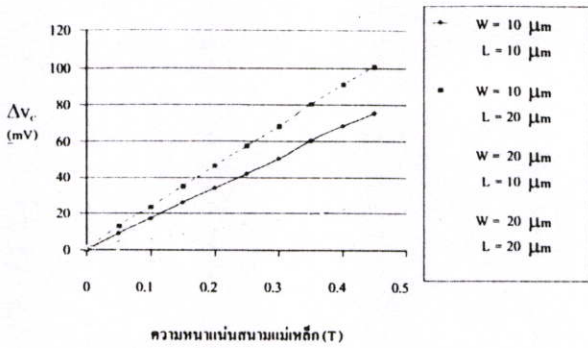
4.3 การวัดผลตอบสนองของสนามแม่เหล็ก

เพื่อหาผลตอบสนองของสนามแม่เหล็ก อุปกรณ์ต่อกับวงจรไบอัสดังรูปที่ 6 แหล่งจ่ายกระแสตรงที่ต่อเข้ากับขาอิมิตเตอร์ ขา B2 ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ขา B1 ต่อกราวด์ โดยที่ขา C1 ต่อกับความต้านทานคงที่ 30 KΩ ส่วนขา C2 ต่อกับความต้านทานปรับค่าได้ เพื่อปรับออฟเซตที่เกิดขึ้นและมีสนามแม่เหล็กพุ่งลงมาในแนวตั้งตัดผ่านตัวอุปกรณ์ โดยการวัดนั้นเปลี่ยนเอาท์พุทอยู่ในรูปของแรงดัน ( $\Delta V_c$ )

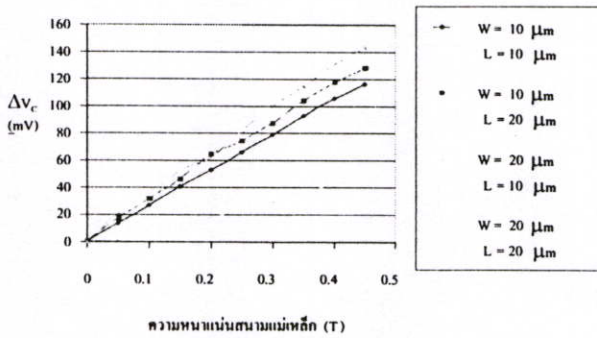


รูปที่ 6 วงจรไบอัสไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

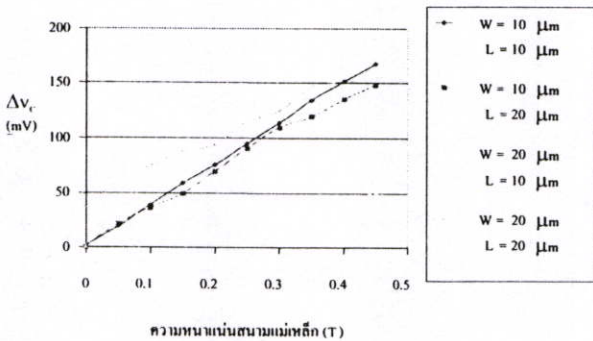
ในการทดลองกำหนดไบอัสกระแสตรงที่เข้าที่ขาอิมิตเตอร์นั่นก็คือ  $I_e = 100\mu A$  และปรับเปลี่ยนแรงดันไบอัสที่ขา B2 นั่นคือ  $V_{b2}$  มีค่า 5,7.5,10 V โดย  $I_e = 100\mu A$  คงเดิม ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta V_c$  กับความเข้มสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 7



(ก)  $I_E = 100 \mu A$   $V_{b2} = 5 V$



(ข)  $I_E = 100 \mu A$   $V_{b2} = 7.5 V$



(ค)  $I_E = 100 \mu A$   $V_{b2} = 10 V$

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta V_c$  กับ สนามแม่เหล็ก

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 7 รูปที่ 7 (ก) ทำการไบอัส  $I_E = 100 \mu A$   $V_{b2} = 5 V$  เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านความหนาแน่นของประจุพาหะที่เคลื่อนที่ไปยังคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากัน กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากันค่า  $\Delta V_c = 0V$  แต่เมื่อเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กจาก 0-0.45 เทสลา ประจุพาหะที่เคลื่อนที่ไปยังคอลเลคเตอร์เบี่ยงเบน เนื่องจากผลของการกระทำของแรงลอเรนซ์ ความหนาแน่นประจุพาหะที่คอลเลคเตอร์ทั้งสองไม่เท่ากัน เกิดความแตกต่างของกระแสคอลเลคเตอร์ ค่าของ  $\Delta V_c$  เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังเหตุจาก

กราฟที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก จากพารามิเตอร์ที่ทำการทดลอง ที่  $W = 10 \mu m$   $L = 20 \mu m$  ได้กราฟที่มีความชันมากที่สุด นั่นคือมีความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูง (sensitivity) มีค่า  $218.62 mV/T$  ส่วนที่พารามิเตอร์  $W = 20 \mu m$   $L = 10 \mu m$  กราฟที่ได้มีความชันน้อยที่สุด มีความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้น้อย มีค่า  $14.95 mV/T$  ส่วนที่พารามิเตอร์  $W = 10 \mu m$   $L = 10 \mu m$  ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กมีค่า  $160.58 mV/T$  และที่พารามิเตอร์  $W = 20 \mu m$   $L = 20 \mu m$  มีความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก  $56.15 mV/T$  กราฟทุกๆพารามิเตอร์มีความเป็นเชิงเส้นสูง รูปที่ 7 (ข) ผลการทดลองเมื่อไบอัส  $V_{b2} = 7.5 V$  โดย  $I_E = 100 \mu A$  คงเดิม เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน  $\Delta V_c = 0V$  ทำการเพิ่มความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจาก 0-0.45 เทสลา ค่าของ  $\Delta V_c$  เพิ่มขึ้นตามความเข้มสนามแม่เหล็กซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไบอัส  $V_{b2} = 5 V$  ทุกๆพารามิเตอร์ ค่า  $\Delta V_c$  ที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่า กราฟที่ได้มีความชันมากกว่า แสดงว่าการไบอัสที่ขา B2 เพิ่มขึ้นความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่พารามิเตอร์  $W = 10 \mu m$   $L = 20 \mu m$  มีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเป็น  $231.17 mV/T$  ส่วนที่พารามิเตอร์  $W = 20 \mu m$   $L = 10 \mu m$  มีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยมีค่า  $109.73 mV/T$  จากกราฟถึงแม้ว่าทุกๆพารามิเตอร์มีค่า ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นแต่ความเป็นเชิงเส้นกลับต่ำลง รูปที่ 7 (ค) ผลการทดลองเมื่อไบอัส  $V_{b2} = 10 V$  โดย  $I_E = 100 \mu A$  เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจาก 0-0.45 เทสลา ค่าของ  $\Delta V_c$  เพิ่มขึ้นตามสนามแม่เหล็ก โดยที่ค่าของ  $\Delta V_c$  มีค่าสูงมากกว่าที่ไบอัส  $V_{b2} = 5, 7.5 V$  กราฟที่ได้ก็มีความชันมากขึ้นแสดงว่า เมื่ออิงไบอัส  $V_{b2}$  มากขึ้นเรื่อยๆค่า ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูงตามไปด้วย แต่กลับทำให้ค่า ความเป็นเชิงเส้นต่ำลง ไปอีก ซึ่งที่พารามิเตอร์  $W = 20 \mu m$   $L = 20 \mu m$  กราฟมีความผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากค่าออฟเซตที่เกิดขึ้นมากจนไม่สามารถปรับลดได้ สาเหตุอาจเนื่องมาจากแรงดันไบอัสเบสที่สูงขึ้น สนามไฟฟ้าแรงประจุพาหะให้ถูกฉุดมากขึ้นถึงแม้ว่าที่พหุมีค่าสูง แต่ค่าออฟเซตสูงชันตามไปด้วย

5.สรุปผลการทดลอง

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวคิดนี้ ใช้โครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และอาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ในการเกิดแรงลอเรนซ์ โครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์มีการปรับเปลี่ยนโดยมีสองขั้วเบสและสองคอลเลคเตอร์ ซึ่งส่วนเบสถูกออกแบบให้มีความยาวมากกว่าปกติ เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการไบอัสที่เบสเพื่อช่วยเร่งสนามไฟฟ้าให้กับประจุพาหะเพื่อให้ประจุพาหะติดไปให้ถึงคอลเลคเตอร์ ในการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta V_c$  กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก เพื่อให้ให้เห็นความแตกต่างความหนาแน่น

ประจุพาหะของคอลเลคเตอร์ทั้งสองอย่างชัดเจน มีการเปลี่ยนโหมคการ วัตถุประสงค์จาก  $\Delta I_c$  เป็น  $\Delta V_c$  จากการทดลองเมื่อไบอัส  $V_{b2} = 5V$  และให้  $I_f = 100\mu A$  เพิ่มความเข้มข้นแม่เหล็กจาก 0-0.45 เทสลา ค่าของ  $\Delta V_c$  เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งกราฟของทุกๆพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นตาม ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกราฟมีความเป็นเชิงเส้นสูง พารามิเตอร์ที่มีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ดีคือที่  $W = 10\mu m$   $L = 20\mu m$  จะมีค่า  $218.62 mV/T$  ส่วนพารามิเตอร์ที่ค่าความไว ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กน้อยคือ  $W = 20\mu m$   $L = 10\mu m$  มีค่า  $14.95 mV/T$  เพิ่มแรงดันไบอัสเป็น  $V_{b2} = 7.5V$  ทำการทดลองโดย การเพิ่มความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจาก 0-0.45 เทสลา ค่า  $\Delta V_c$  ของ ทุกพารามิเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการไบอัส  $V_{b2} = 5V$  แสดงว่า ถ้าไบอัสที่ขาเบสเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่าความไวในการตรวจจับ สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นด้วย แต่ค่าความเป็นเชิงเส้นกลับต่ำลง เมื่อเพิ่มการ ไบอัส  $V_{b2} = 10V$  กราฟที่ได้มีความชันเพิ่มมากขึ้นอีก ค่าความไวในการ ตรวจจับสนามแม่เหล็กเพิ่มสูงมากขึ้นอีก ถ้าไบอัสเบสมากขึ้นทำให้ ประจุพาหะถูกฉีดมากขึ้น เนื่องจากถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า กระแส คอลเลคเตอร์สูงขึ้น เพราะฉะนั้นความหนาแน่นประจุพาหะที่มีการ เบี่ยงเบนเพิ่มมากขึ้น เกิดความแตกต่างของกระแสคอลเลคเตอร์สูงขึ้น นั่นเอง ทุกๆพารามิเตอร์ เมื่อมีการ ไบอัสเพิ่มขึ้นกราฟที่ได้มีความ ผิดเพี้ยนนั้นคือความเป็นเชิงเส้นต่ำลงอันเนื่องมาจากค่าออฟเซตที่สูงขึ้น ค่าออฟเซตที่สูงขึ้นเกิดจากพาหะถูกฉีดไปยังคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้นซึ่งอาจ มีพาหะที่ไม่เบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นทำให้เกิดความผิดเพี้ยนได้ จากการทดลอง เห็นว่าค่า  $W$  ที่มีค่าน้อยมีความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ดีกว่า  $W$  ที่มีค่ามาก เนื่องจากถ้าระยะ  $W$  มากต้องใช้สนามแม่เหล็กมาก เช่นกันในการเบี่ยงเบนประจุพาหะเพราะถ้าให้สนามแม่เหล็กน้อยอาจมี ประจุพาหะบางส่วนที่ไม่เบี่ยงเบนซึ่งประจุพาหะอาจพุ่งตรงไปยังส่วน BI เอาท์พุทที่ได้มีค่าลดลงจึงทำให้ค่าความไวในการตรวจจับ สนามแม่เหล็กมีค่าน้อย ส่วนระยะ  $L$  นั้นต้องมีระยะพอสมควรถ้าไกล เกินไปกระแสอาจจะเบี่ยงเบนไปไม่ถึงใกล้เกินไปก็อาจไม่เกิดการ เปลี่ยนแปลง อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโคชใช้โครงสร้างของ ไบโพลาร์นี่มีเอาท์พุทที่มีค่าสูงอยู่ในระดับมิลลิโวลต์ สามารถนำไปใช้ งานเพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กได้จริงซึ่งอาจนำไปใช้กับวงจรรวม หรือ ออกแบบวงจรเพื่อมารองรับก็ได้

## 6.กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ นายนิสิต นະชาตรีและ นายอนุวัฒน์ สุวรรณผล นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มีส่วน ช่วยเหลือในการวัดข้อมูล

## 7.เอกสารอ้างอิง

- [1] Julinan W. Gardner, "Microsensors," McGraw-Hill Book Company, pp. 199-213, 1994.
- [2] Albert W. Vinal, "Operating Principles Transistor Magnetic Sensor," IEEE Tran. On Electron Devices, vol.ed31, pp. 148-156 no.10, 1984
- [3] Henry P. Baltus, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor," IEEE Tran.ON Electron Devices, vol.74, pp.315-317, no.8, 1986
- [4] T. Nakamura and K. Maenaka, "Integrated Magnetic Sensor," Sensors and Actuators, vol.35, pp.21-23, 1990
- [5] John Wiley, "Semiconductor Sensor," McGraw-Hill Book Company, pp. 236-242, 1994.

รายละเอียดการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27  
 27<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference Program

สาขาบทความที่มีผลต่อการประชุม :

- ไฟฟ้ากำลัง (PWF)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PEL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CEM)
- ระบบควบคุมและถา วัดถุณ (CT)
- อินเทอร์เน็ต (E-IE)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GR)



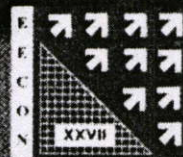
11 - 12 พฤศจิกายน 2547

โรงแรมอีสปาร์ค ราชภา ออคิด ขอนแก่น

ดำเนินการจัดการประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



## แมกนีโตทรานซิสเตอร์ โหมดการทำงานสามขั้ว

### Three Terminals Mode Magnetotransistor

ชนะ ลิภัทรพงศ์พันธ์ วีระ เพ็งจันทร์ และ เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร. 0-2739-0643 โทรสาร 0-2739-2384

E-mail: baskmitl@hotmail.com, weera@2001plaza.com, kptoempo@kmitl.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ซึ่งปกติมีห้าขั้วมาใช้งาน ในโหมดการทำงานแบบสามขั้ว ซึ่งได้แก่ ขั้วอิมิตเตอร์ ขั้วคอลเลคเตอร์ และขั้วเบส การทำงานอาศัยผลความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ ( $I_b - I_c$ ) แทนความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $I_{c1} - I_{c2}$ ) ผลการทดลองแสดงว่า โหมดการทำงานแบบสามขั้วสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ และเป็นเชิงเส้น ความไวจะมีค่าน้อยกว่าในโหมดการทำงานปกติ แรงดันออฟเซตสามารถปรับเป็นศูนย์ได้ ค่าความไวสามารถเพิ่มได้จากสนามไฟฟ้าที่ให้ออกนอก จากผลการทดลองสามารถนำไปออกแบบเป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดสามขั้วได้ต่อไป

คำสำคัญ : แมกนีโตทรานซิสเตอร์, ไบโพลาร์, ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก

#### Abstract

This paper presents the operation of magnetotransistor, which usually have five terminals, in three terminals mode. These terminals are one emitter, one base and one collector. The device detects magnetic field by the difference of base and collector current instead of the difference of both collector currents in regular mode. The experimental results have been shown that output voltage linearly depend on magnetic field density but the sensitivity is less than in the case of regular mode. The zero offset can be adjusted and also sensitivity can be increased by applied electric field. It indicates that three terminals can be designed for optimum device.

Keywords: magnetotransistor, bipolar, magnetic sensor

#### 1. บทนำ

ไบโพลาร์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดย

อาศัยความแตกต่างของกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง [1-5] โดยมีสนามไฟฟ้า ระหว่างเบสสองขาช่วยในการทำงาน ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้เหมาะสำหรับใช้กับวงจรรวมแต่ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ เป็นอุปกรณ์ตรวจจับตัวเดียวๆ เนื่องจากมีจำนวนขั้วถึงห้าขั้ว การใช้งานและการไบอัสมีความยุ่งยาก

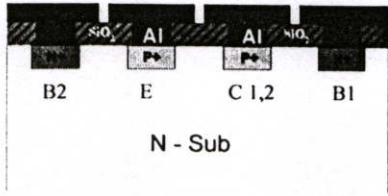
ในบทความนี้ได้ประยุกต์การทำงานของ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ดังกล่าว โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้สะดวกในการใช้งาน และสามารถประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับแม่เหล็กตัวเดียวๆ ได้ ซึ่งต้องการให้มีการทำงานเหมือนทรานซิสเตอร์ปกติที่มีสามขั้วคือ อิมิตเตอร์ เบส และคอลเลคเตอร์ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ปกติที่มีห้าขั้วทำการทดลองเปรียบเทียบการตรวจจับสนามแม่เหล็กในลักษณะการทำงานปกติและการใช้งานแบบสามขั้ว ในการสร้างตัวอุปกรณ์ตัวเดียวกัน ผลของการทดลองจะนำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีสามขั้วต่อไป

#### 2. โครงสร้างและหลักการทำงาน

รูปที่ 1(ก) แสดงภาพด้านบนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ จากภาพด้านบนแสดงให้เห็นถึงขั้วอุปกรณ์ห้าขั้ว อันได้แก่ขั้วเบสสองขั้ว B1 และ B2 ขั้วคอลเลคเตอร์สองขั้ว C1 และ C2 และขั้วอิมิตเตอร์หนึ่งขั้วคือ E



รูปที่ 1(ก) ภาพถ่ายไบโพลาร์ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 1(ข) โครงสร้างของไบโพลาร์ แมกนีโตทรานซิสเตอร์

แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถสร้างได้จากนำแผ่นฐานรองซิลิคอนระนาบ(100) มีค่าที่กีดความต้านทาน 2-4 โอห์ม-เซนติเมตร ขั้วคอลเลคเตอร์ทั้งสอง และ อิมิตเตอร์ถูกสร้างโดยการแพร่อะตอมสารเจือโบรอนขนาด  $N_A=2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  เกิดเป็นส่วน P<sup>+</sup> ขั้วเบสทั้งสองสร้างโดยการแพร่สารเจือฟอสเฟตขนาด  $N_D= 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  เพื่อเป็นรอยสัมผัสของเบส ความกว้างของเบสคือระยะห่างระหว่างอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ซึ่งมีค่า 20 ไมโครเมตร และระยะห่างของขั้วคอลเลคเตอร์ทั้งสองมีความยาว 10 ไมโครเมตร รูปที่ 1(ข) แสดงภาพตัดขวางโครงสร้างของอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ดังกล่าว

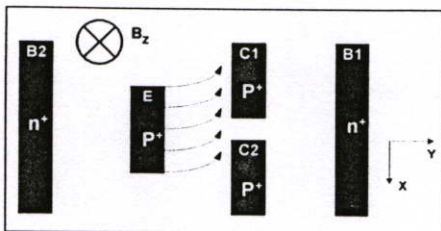
หลักการการทำงานของ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ อาศัยหลักการของทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ และหลักการแรงลอเรนซ์ เมื่อทำการไบอัสไปข้างหนึ่งระหว่างอิมิตเตอร์กับเบส จะเกิดการฉีดพาหะจากอิมิตเตอร์ไปยังคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ซึ่งถูกออกแบบให้มีลักษณะสมมาตรกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองซึ่งมีค่าเท่ากัน เมื่อมีสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากพื้นผิว จะเกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะที่วิ่งจากอิมิตเตอร์ผ่านเบสไปยังคอลเลคเตอร์ในทิศทางดังแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งจะทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองมีค่าแตกต่างตามแรงลอเรนซ์ เกิดจากความเข้มสนามแม่เหล็กดังสมการ (1) และ (2)

$$F_L = q \cdot v \times B_z \tag{1}$$

ซึ่ง  $v$  คือแรงดันครีฟท์,  $B_z$  คือความเข้มสนามแม่เหล็ก  $F_L$  คือแรงลอเรนซ์ และ

$$\Delta I_C = Kg (\mu_P + \mu_N) B_z I_E \tag{2}$$

ซึ่ง  $\mu_P$  และ  $\mu_N$  คือค่าความคล่องตัว (mobility) ของอิเล็กตรอนและโฮล  $Kg$  เป็นค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับลักษณะรูปทรงของตัวอุปกรณ์



รูปที่ 2 ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ (โฮล)

สำหรับขั้วเบสทั้งสองมีไว้เพื่อให้สนามไฟฟ้า เพื่อเร่งพาหะจากอิมิตเตอร์ให้ไปยังคอลเลคเตอร์ได้มากขึ้น

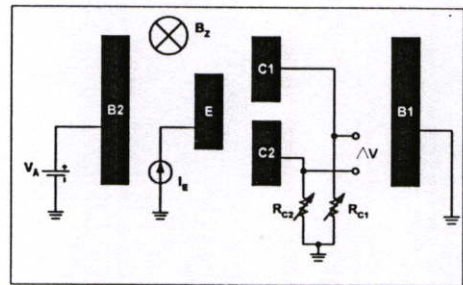
### 3. การทดลองและผลการทดลอง

#### 3.1 แบบทำงานปกติ

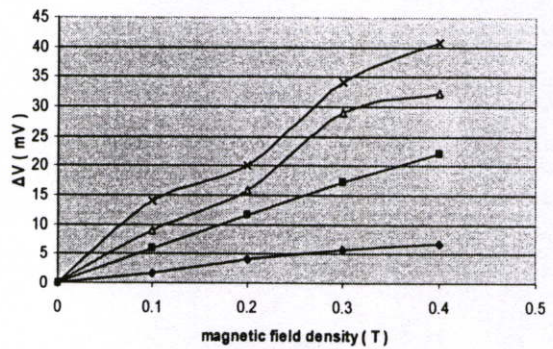
จากการทดลองทำการเปรียบเทียบเทียบอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ในแบบทำงานปกติและแบบการทำงานสามขั้ว

รูปที่ 3(ก) แสดงวงจรไบอัสการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ เนื่องจากอุปกรณ์เป็นแบบ p-n-p ทรานซิสเตอร์ สนามไฟฟ้าบริเวณเบสได้จาก  $V_A$  ที่ให้ภายนอกระหว่างขั้ว B2 และ B1 กระแสการทำงานของอิมิตเตอร์  $I_E$  ใช้วงจรกระแสคงที่ ที่ค่า  $I_E = 100 \mu A$  ที่ขั้วคอลเลคเตอร์ C1 และ C2 ต่อค่า  $R_{C1}$  และ  $R_{C2}$  เพื่อนำค่าความแตกต่างของแรงดันเนื่องจากกระแสคอลเลคเตอร์มาเป็นเอาต์พุต

รูปที่ 3(ข) แสดงผลการทดลองที่ได้ที่ค่ากระแส  $I_E = 100 \mu A$  โดยเปลี่ยนค่าแรงดัน  $V_A$  ค่าต่างๆ ที่ค่า 5, 7, 10 และ 12 โวลต์ ผลที่ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของแรงดันเอาต์พุต  $\Delta V$  กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก



(ก)



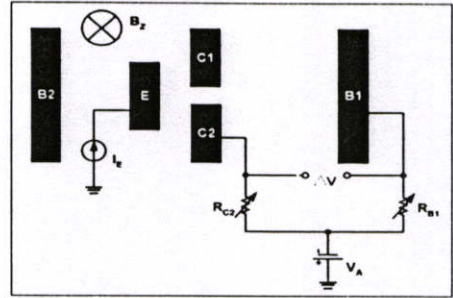
(ข)

รูปที่ 3(ก) วงจรไบอัสแบบทำงานปกติ และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta V$  กับ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

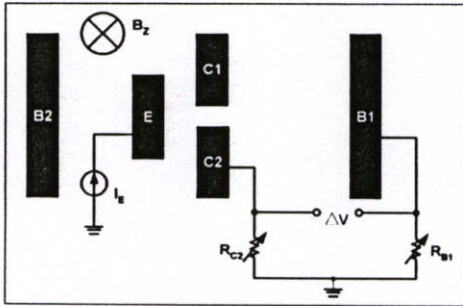
3.2 แบบการทำงานแบบสามขั้ว

รูปที่ 4(ก) แสดงวงจรการไบอัสการทำงานของอุปกรณ์ ในแบบการทำงานแบบสามขั้ว โดยจะใช้ขั้วอิมิตเตอร์ E ขั้วคอลเลคเตอร์ C2 และขั้วเบส B1 ที่ขั้วคอลเลคเตอร์ C2 และเบส B1 ต่อความต้านทานปรับค่าได้  $R_{C2}$  และ  $R_{B1}$  การทำงานอาศัยผลความแตกต่างระหว่างกระแส  $I_{B1}$  และ  $I_{C2}$

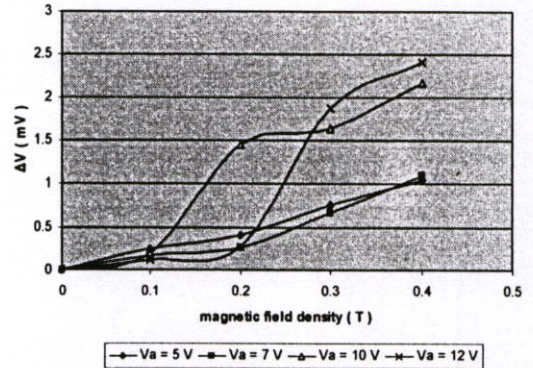
รูปที่ 4(ข) แสดงผลการทดลองที่ได้ โดยกระทำที่ค่ากระแส อิมิตเตอร์  $I_E$  ค่าต่างๆ ได้แก่  $I_E = 100, 200, 300, 400 \mu A$  เอทท์ทุกที่ได้ แสดงอยู่ในรูปความแตกต่างของแรงดัน  $\Delta V$



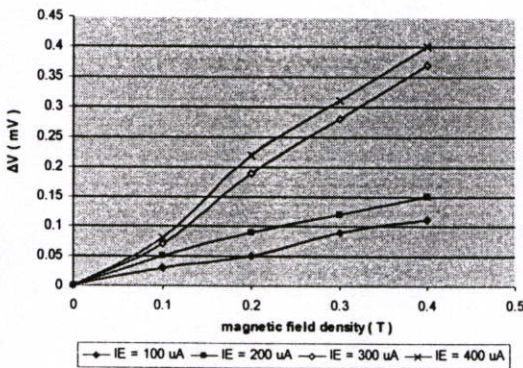
(ก)



(ข)



(ข)

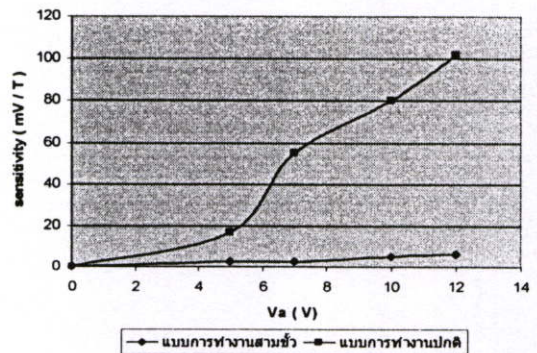


(ข)

รูปที่ 4(ก) วงจรไบอัสแบบทำงานแบบสามขั้ว และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta V$  กับ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5(ก) แสดงผลของสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปภายนอกด้วยแรงดัน  $V_A$  ซึ่งผลที่ได้แสดงรูปที่ 5(ข) โดยทำที่ค่ากระแสอิมิตเตอร์  $I_E = 100 \mu A$  รูปที่ 6 แสดงค่าความไวสุทธิ ( absolute sensitivity )  $S_s = mv/T$  ของอุปกรณ์ในแบบการทำงานปกติและแบบการทำงานสามขั้ว โดยเป็นความสัมพันธ์กับค่าแรงดัน  $V_A$  ที่ใช้ภายนอก

รูปที่ 5 การต่อ  $V_A$  เพื่อเพิ่มสนามไฟฟ้า



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กกระหว่างแบบการทำงานปกติ กับ การทำงานแบบสามขั้ว

4. วิจัยรณผลการทดลอง

4.1 โหมดการทำงานปกติ

จากรูปที่ 3(ข) แสดงผลการทดลองในแบบการทำงานปกติ สนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.4 T ที่ค่ากระแส  $I_E = 100 \mu A$  ขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็ก ค่าเอาท์พุทออฟเซตสามารถปรับค่าได้เป็นศูนย์ ( $\Delta V = 0$ ) เมื่อให้สนามแม่เหล็กทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิว ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะโฮล ซึ่งทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองมีค่าแตกต่างกันเกิดความแตกต่างของแรงดัน  $\Delta V$  ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กมีความเป็นเชิงเส้นที่ดีที่ค่าแรงดัน  $V_A = 5, 7$  โวลท์ เมื่อเพิ่ม

ค่า  $V_A$  สูงขึ้นจะทำให้ค่าความไวสุทธิเพิ่มขึ้นแต่ความเป็นเชิงเส้นไม่ดีขึ้นเท่ากับแรงดัน  $V_A$  ค่าต่ำๆ

#### 4.2 โหมดการทำงานแบบสามขั้ว

รูปที่ 4(ก) แสดงการใช้งานแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในแบบสามขั้ว การทำงานอาศัยหลักความแตกต่างของกระแสคอลเลคเตอร์  $C_2$  และกระแสเบส  $I_{B1}$  เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กสามารถปรับค่า  $R_{C2}$  และ  $R_{B1}$  ทำให้ค่าความต่างของแรงดัน  $\Delta V$  มีค่าเป็นศูนย์ได้ เมื่อมีสนามแม่เหล็กแนวตั้งฉากกับพื้นผิวจะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ตั้งในรูปที่ 2 ซึ่งจากทิศทางในรูปที่ 2 กระแสคอลเลคเตอร์  $I_{C2}$  จะมีค่าน้อยลง และพาหะโฮลเบี่ยงเบนจากคอลเลคเตอร์  $C_2$  จะวิ่งอยู่ในเบสและรวมตัวเป็นกระแสเบส  $I_{B1}$  ทำให้กระแสเบส  $I_{B1}$  มีค่าเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กกลับทิศ จะได้ผลลัพท์ในทางตรงกันข้ามเช่นเดียวกัน สำหรับขั้ว  $C1$  และ  $B2$  ที่ปล่อยลอยไว้มันจะไม่มีผลทางไฟฟ้าเปรียบเสมือนชิ้นสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกับฐานรองเป็นตัวแยก ( Isolation ) หรือ ตัวป้องกัน ( Guard ring )

จากผลการทดลองในรูปที่ 4(ข) เมื่อเพิ่มค่ากระแสอิมิตเตอร์  $I_E$  มากขึ้น จะทำให้ปริมาณการฉีดพาหะโฮลจากอิมิตเตอร์เพิ่มมากขึ้นและได้ค่าความแตกต่างของแรงดัน  $\Delta V$  เพิ่มมากขึ้นผลตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กที่ค่ากระแสอิมิตเตอร์ต่างๆ มีความเป็นเชิงเส้นดีผลของสนามไฟฟ้าในเบสโดยผ่านทางค่าแรงดัน  $V_A$  จากภายนอกดังในกราฟรูปที่ 5(ข) และรูปที่ 6 จะเป็นในโหมดการทำงานแบบสามขั้วจากกราฟจะไม่เห็นผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน  $V_A$  กับ ค่าความไวสุทธิมากนักซึ่งแตกต่างจากการทำงานในแบบการทำงานปกติ

#### 5. สรุปผลการทดลอง

ไบโพลาร์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ในแบบการทำงานสามขั้วโดยใช้ขั้วอิมิตเตอร์ คอลเลคเตอร์และเบส สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้มีค่าความเป็นเชิงเส้นดี เมื่อทำการเปรียบเทียบการทำงานในแบบการทำงานปกติยังให้ค่าความไวสุทธิต่ำกว่า ผลของสนามไฟฟ้าในส่วนเบสมีผลต่อค่าความไวในโหมดการทำงานสามขั้วค่อนข้างน้อย และจะทำให้ความเป็นเชิงเส้นสูญเสียไป จากการทดลองนี้จะนำไปสู่การออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดสามขั้ว เพื่อใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเพื่อปรับปรุงใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กอุปกรณ์เดี่ยวต่อไป

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มีส่วนช่วยเหลือในการแนะนำการใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัด

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] ชนะ ลีภทรพงศ์พันธ์, โสภณ พรหมชัย, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, "ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26, เดือน พฤศจิกายน ปี 2546, หน้า 1419-1424
- [2] H. Trujillo, A. Nagy, P Rodrigues and F. Rodrigues, Merged lateral bipolar magnetotransistor, Sensors and Actuators A,50 ( 1995 ) 177-181
- [3] H. Trujillo, A. Nagy and J. C. Cruz, Influence of topology on the response of lateral magnetotransistor, Sensors and Actuators A, 45,1994
- [4] H. P. Baltes and R. S. Popovic. "Integrated semiconductor magnetic field sensor." Proc. IEEE. Vol. 74. pp. 1107-1132. 1986.
- [5] Juliann W. Gardner, " Microsensors ," McGraw-Hill Book Company, pp. 199-213, 1994.

#### ประวัติผู้เขียน



นายชนะ ลีภทรพงศ์พันธ์  
ปริญญาตรี วศบ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาปริญญาโท สาขา  
วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สจล.



นายวีระ เพ็งจันทร์  
ปริญญาตรี วศบ. สาขาวิศวกรรมมหาวิทาลัย  
เชียงใหม่ ปริญญาโท วศบ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สจล. ปัจจุบันนักวิจัยของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์



นายเดิมพงษ์ เพ็ชรกุล  
ปริญญาตรี วศบ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
สจล. ปริญญาโท วศบ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สจล.และ ปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
Tokai University, Japan. ปัจจุบันเป็น  
อาจารย์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรม-  
ศาสตร์ สจล.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28  
28<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference



**Volume II**

ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)  
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)  
การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)  
อิเล็กทรอนิกส์ (EL)  
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

Electrical Engineering  
Electrical Engineering



Western  
Digital



ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
20 - 21 ตุลาคม 2548  
ณ โรงแรม เพ็ชร วิลเลจ จ.ภูเก็ต

# ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยความแตกต่างระหว่าง กระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์

## Bipolar Transistor Sensing Magnetic Field by the Difference of Base and Collector Current

ชนะ ถิภทรพงศ์พันธ์ วีระ เห่งจันทร์ และ เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล  
ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
โทร. 0-2739-0643 โทรสาร 0-2739-2384  
E-mail: firstmambo@hotmail.com, weera@2001plaza.com, kptoempo@kmitl.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง โครงสร้างประกอบด้วย อิมิตเตอร์, เบสและคอลเลคเตอร์ แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะส่วนน้อยในเบส ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสอิมิตเตอร์ ผลการทดลองแสดงว่าไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้และเป็นเชิงเส้น ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบตัวเดียน้อยกว่าแบบสองตัวรวมกระแส ความไวสามารถเพิ่มได้จากกระแสการทำงานอิมิตเตอร์ จากผลการทดลองไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์สามารถพัฒนาเป็นอุปกรณ์ดิจิตอลได้

คำสำคัญ : ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์, อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

### Abstract

This paper introduces a bipolar transistor for a vertical magnetic field, which consists of three terminals including; emitter, collector and base. The Lorentz force affects directly to the deflection of minority carriers in base. Also it affects in the difference between collector and base current, which relates to magnetic field and emitter current. The experimental results have been shown bipolar transistor can detect magnetic field and output current linearity. The sensitivity of individual connection is less than the merge connection. This pattern indicates the topology development of bipolar transistor to be the discrete device.

Keywords: Bipolar transistor, magnetic sensor

### 1. บทนำ

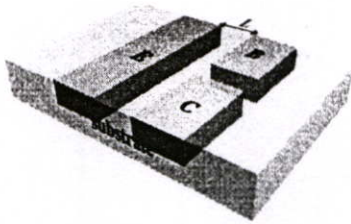
ในปัจจุบันอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสามารถนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ เช่น มอสเฟต, ไดโอด, ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ฯลฯ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างขนาดเล็ก, สัญญาครบถ้วนที่เอาท์พุทมีค่าต่ำ, สามารถใช้งานกับวงจรรวมได้และสามารถประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้หลากหลาย [3]

ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่นำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (vertical magnetotransistor) และไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ตามแนวนอน (lateral magnetotransistor) โดยปกติแล้วโครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ประกอบด้วย สองคอลเลคเตอร์, หนึ่งอิมิตเตอร์และสองขั้วเบสคอนแทก ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ ทำให้พาหะเบี่ยงเบนเกิดความไม่สมดุลของกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง การตรวจจับสนามแม่เหล็กของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ขึ้นอยู่กับการเบี่ยงเบนของพาหะและอัตราการผลิตพาหะของอิมิตเตอร์ [1-5]

บทความนี้นำเสนอไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีขาใช้งาน 3 ขา ประกอบด้วย อิมิตเตอร์, เบสและคอลเลคเตอร์ ตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทาง Z โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์  $I_c$  กับกระแสเบส  $I_b$  ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ 3 ขานี้ สามารถใช้งานได้ง่ายเหมือนกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ปกติ, ลดความยุ่งยากในการไบอัส และสามารถพัฒนาเป็นอุปกรณ์ดิจิตอลได้

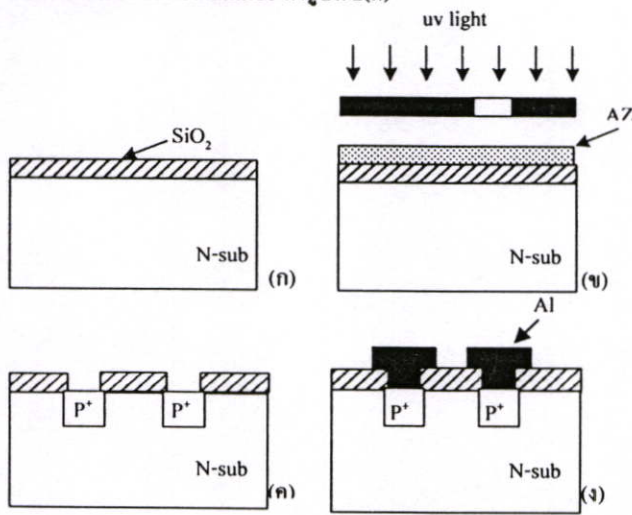
### 2. กระบวนการสร้างและหลักการทำงาน

โครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แสดงดังรูปที่ 1 เป็นไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แบบ PNP ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน ประกอบด้วย อิมิตเตอร์ E, เบส B และคอลเลคเตอร์ C



รูปที่ 1 โครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

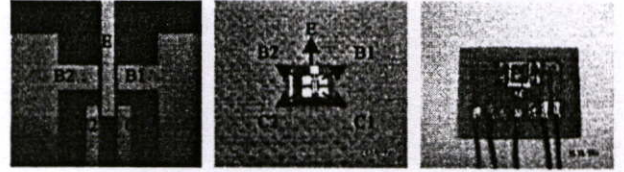
กระบวนการสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เริ่มจากการนำแผ่นซิลิคอน ชนิด N หนา 100 ไมครอน ความต้านทาน 2-4 Ω-cm ความหนาแผ่น 400 ไมครอน สร้างซิลิคอนไดออกไซด์ SiO<sub>2</sub> ด้วยกระบวนการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 °C ในเวลา 5 ชั่วโมงให้ความหนา 5000 Å ได้ดังรูปที่ 2(ก) กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีและทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส N<sup>+</sup> มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือ N<sub>D</sub> = 10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup> ที่อุณหภูมิ 1000 °C เวลา 20 นาที ในบรรยากาศไนโตรเจนและ drive in ในบรรยากาศออกซิเจนเวลา 60 นาทีได้ส่วนเบสดังรูปที่ 2(ข) ทำการแพร่สารเจือโบรอน P<sup>+</sup> ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ N<sub>A</sub> = 2×10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup> ได้ส่วนอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ ดังรูปที่ 2(ค)



รูปที่ 2 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง

ทำการสร้างคอนแทคและเคลือบชั้นอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการระเหยในสุญญากาศ Evaporation ที่ความดัน 2.5×10<sup>-6</sup> Torr จากนั้นกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเพื่อสร้างลวดลายอะลูมิเนียมและทำการ sintering ที่อุณหภูมิ 500°C ในบรรยากาศไนโตรเจนเวลา 12 นาที ดังรูปที่ 2 (ง) ความกว้างของเบสคือ ระยะห่างระหว่างอิมิตเตอร์กับเบส

และคอลเลคเตอร์ ซึ่งมีค่า 20 ไมครอนเมตร และระยะห่างระหว่างเบสกับคอลเลคเตอร์มีค่า 40 ไมครอนเมตรขั้นตอนกระบวนการสร้างแสดงดังรูปที่ 2(ก)-(ง) สำหรับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ภาพถ่ายไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์

ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เมื่อได้รับการไบอัสไปข้างหน้าที่รอยต่ออิมิตเตอร์และเบส พาหะ(โฮล) เคลื่อนที่ออกจากอิมิตเตอร์ข้ามเบสไปยังคอลเลคเตอร์ เกิดกระแสสองส่วนคือกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ ในภาวะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์เท่ากัน แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตั้งฉากแนวตั้ง ( ทิศทาง Z ) ตัดผ่านไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ พาหะถูกกระทำโดยแรงลอเรนซ์ทำให้พาหะเบี่ยงเบนและเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ แรงลอเรนซ์หาได้โดยสมการที่ 1

$$F_L = q \cdot v \times B_Z \tag{1}$$

โดยที่ v คือ ความเร็วครีฟท์

B<sub>Z</sub> คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในทิศทาง Z

กระแสอิมิตเตอร์คือการรวมกันของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ ( I<sub>E</sub> = I<sub>B</sub> + I<sub>C</sub> ) ซึ่งสามารถแสดงอยู่ในทอมของปริมาณความหนาแน่นของโฮล J<sub>py</sub> ดังสมการที่ 2

$$I_E = J_{py} \cdot W_E \cdot d \tag{2}$$

โดยที่ W<sub>E</sub> คือความกว้างอิมิตเตอร์ และ d คือความลึกรอยต่อ

การไม่สมดุลของกระแสเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับความกว้างเบส L, สภาพความคล่องตัวของโฮล μ<sub>p</sub> และความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก B<sub>Z</sub> กระแสไหลตามแนวอนจะเบี่ยงเบนในมุม Θ<sub>II</sub> ซึ่งสามารถหาได้โดย tan Θ<sub>II</sub> = μ<sub>p</sub> · B<sub>Z</sub> การเปลี่ยนแปลงของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์หาได้โดยสมการที่ 3 สามารถคำนวณโดยความหนาแน่นกระแส J<sub>py</sub> ในหนา L=W<sub>B</sub>, ความกว้างอิมิตเตอร์ W<sub>E</sub> และมุมเบี่ยงเบน tan Θ<sub>II</sub>

$$\Delta I_{CB} = J_{py} \cdot W_E \cdot W_B \cdot \tan \Theta_{II} \tag{3}$$

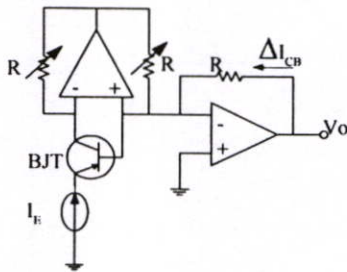
ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กหาได้โดยสมการที่ (4) และสมการที่ (5)

$$S_R = \frac{\Delta I_{CB}}{I_E \cdot B_Z} \tag{4}$$

$$S_R = \frac{L \cdot \mu_p}{d} \tag{5}$$

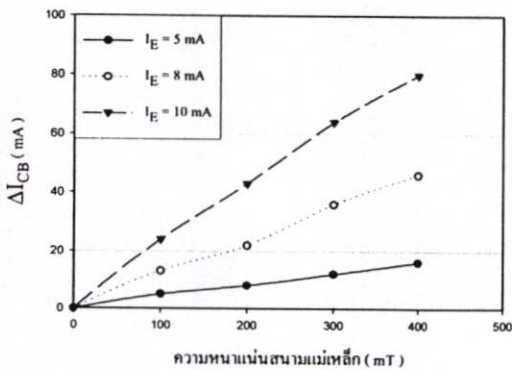
3. การทดลองและผลการทดลอง

วงจรการวัดทดลองของ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แสดงดังรูปที่ 3 กระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E$  ใช้วงจรกระแสคงที่ เอาท์พุทคือ การวัดความเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสที่ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ

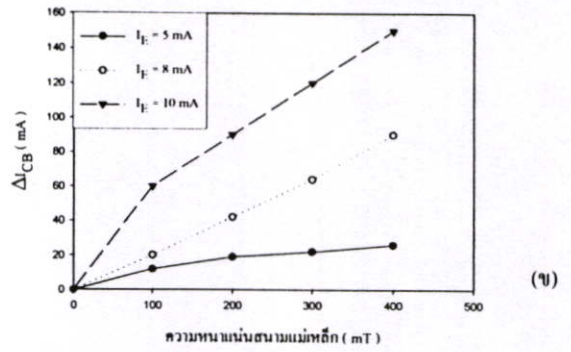


รูปที่ 3 วงจรการวัดทดลอง

รูปที่ 4(ก) แสดงผลการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็ก  $B_Z$  แบบตัวเดียวของ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่กระแสการทำงาน  $I_E = 5, 8, 10$  mA โดยปรับเปลี่ยนความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก 100-400 mT วัดเอาท์พุทในรูปแบบ  $\Delta I_{CB}$  รูปที่ 4(ข) แสดงผลการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็ก  $B_Z$  แบบสองตัวรวมกระแส การวัดแบบสองตัวรวมกระแสคือการนำเอาท์พุทของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์สองตัวที่มีทิศทางเบี่ยงเบนตรงข้ามกันมารวมกัน โดยเอาท์พุท  $\Delta I_{CB}$  อยู่ในรูปแบบของ  $[(I_{B1}+I_{B2}) - (I_{C1}+I_{C2})]$



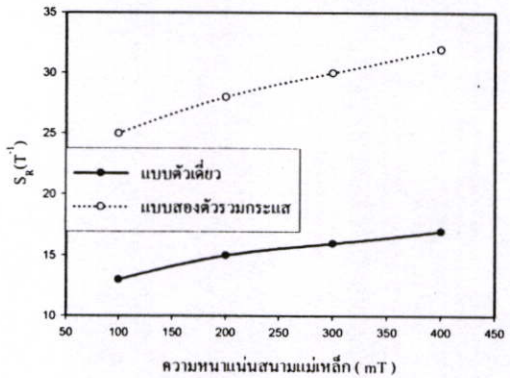
(ก)



(ข)

รูปที่ 4 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่กระแสการทำงาน  $I_E = 5, 8, 10$  mA (ก) แบบตัวเดียว และ (ข) แบบสองตัวรวมกระแส

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ระหว่างแบบตัวเดียว และ แบบสองตัวรวมกระแสที่กระแสการทำงาน  $I_E = 8$  mA ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กระหว่างตัวเดียวกับแบบสองตัวรวมกระแส

4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กในทิศทาง Z ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ การเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นของสนามแม่เหล็กทำให้  $\Delta I_{CB}$  เพิ่มขึ้น นั่นคือแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองสนามแม่เหล็กของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ในภาวะปกติไม่มีสนามแม่เหล็กไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ได้รับการไบอัส พาหะโฮลเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปคอลเลคเตอร์และเบส ปริมาณพาหะสะสมที่เบสและคอลเลคเตอร์มีปริมาณเท่ากัน ( $\Delta I_{CB} = 0$ ) แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทาง Z แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะทำให้พาหะมีทิศทางเคลื่อนที่ที่เบี่ยงเบนไปสะสมที่เบส กระแสเบสจึงเพิ่มขึ้นอย่างมากตรงข้ามกับกระแสคอลเลคเตอร์ที่ลดลง การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์ทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น พาหะจึงไปสะสมที่เบสมากยิ่งขึ้นทำให้ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์

และกระแสเบสเพิ่มขึ้น แสดงถึงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่สูงขึ้นเช่นเดียวกันผลการทดลองรูปที่ 4(ข) การวัดแบบสองตัวรวมกระแสค่า  $\Delta I_{CB}$  สูงกว่าการวัดแบบตัวเดียว ซึ่งแสดงถึงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า สามารถวิเคราะห์ได้โดยสมการที่ (6)-(8) โดยที่ a และ b เป็นไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แบบเดียวกันแต่มีทิศทางเบี่ยงเบนของพาหะตรงข้ามกัน

$$\Delta I_{CB (merge)} = \Delta I_{CB (a)} + \Delta I_{CB (b)} \quad (6)$$

$$\Delta I_{CB (a)} = \Delta I_{CB (b)} \quad (7)$$

$$S_{R (merge)} = \frac{2\Delta I_{CB (ind)}}{I_{Fz} B_z} \quad (8)$$

## 5. สรุปผลการทดลอง

ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์ การวัดแบบสองตัวรวมกระแสสามารถทำให้ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบการวัดแบบตัวเดียว การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์ไม่ทำให้ความเป็นเชิงเส้นต่ำลงตรงข้ามกับความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น โครงสร้างที่ง่ายของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ช่วยลดความยุ่งยากในการไบอัสและสามารถพัฒนาเป็นอุปกรณ์คิสคริดได้อีกด้วย

## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มีส่วนช่วยเหลือทุนสนับสนุนงานวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Trujillo, A. Nagy and J.C. Cruz, Influence of topology on the response of lateral magnetotransistor, Sensors and Actuators A, 45 (1994) 179-182
- [2] H. Trujillo, A. Nagy, P. Rodrigues and F. Rodrigues, Merged lateral bipolar magnetotransistor, Sensors and Actuators A, 50 (1995) 177-181
- [3] L. Ristic, T. Smy and Henry P. Baltes, A Lateral Magnetotransistor Structure with a Linear Response to the Magnetic field, IEEE Trans Electron Devices, vol.36, NO 6, 1989.
- [4] Henry P. Baltes, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor," IEEE Trenton Electron Devices, vol.74, pp.315-317, no.8, 1986
- [5] T. Nakamura and K. Maene'ka, "Integrated Magnetic Sensor," Sensors and Actuators, vol.35, pp.21-23, 1990

## ประวัติผู้เขียน



นายชนะ ลิภทพงษ์พันธ์  
ปริญญาตรี วศบ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาปริญญาโท สาขา  
วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สจล.



นายวีระ เพ็งจันทร์  
ปริญญาตรี วศบ. สาขาวิศวกรรมมหาวิทาลัย  
เชียงใหม่ ปริญญาโท วศม. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สจล. ปัจจุบันนักวิจัยของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์



นายเดมพงษ์ เพ็ชรกุล  
ปริญญาตรี วศบ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
สจล. ปริญญาโท วศม. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สจล. และ ปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
Tokai University, Japan. ปัจจุบันเป็น  
รองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์
วัน เดือน ปี เกิด	18 พฤศจิกายน 2523
ที่อยู่	3/185 หมู่บ้านอยู่เจริญ แขวงสีกัน เขตดอนเมือง กรุงเทพฯ 10210
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	วิศวกรรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. Chana Leepattarapongpan, Sapon Prommachai, Toempong Phetchakul, "Magnetic field detector by Bipolar Transistor Device," 29<sup>th</sup> Congress on Science and Technology of Thailand, Khon Kean University, October 20-22, 2003.
2. Toempong Phetchakul, Chana Leepattarapongpan Weera Pengchan, "Magnetotransistor Sensing by the Difference of Base and Collector Current," International Symposium on Integrated Circuits, Singapore, September 8-10, 2004.
3. Toempong Phetchakul, Weera Pengchan, Chana Leepattarapongpan, "Three Terminals Magnetotransistor Sensing by Difference of Base and Collector Current," International Conference on Materials for Advance Technologies, Singapore, July 3-8, 2005.
4. ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์, โสภณ พรหมชัย, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, "ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนดิ่ง", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26, เดือน พฤศจิกายน ปี 2546, หน้า 1419-1424
5. ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์, วีระเพ็ญจันทร์, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, "แมกนีโตทรานซิสเตอร์โหมดการทำงานสามขั้ว", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 27, เดือน พฤศจิกายน ปี 2547, หน้า 273-276
6. ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์, วีระ เพ็ญจันทร์, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, "ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28, เดือน ตุลาคม ปี 2548, หน้า 1225-1228