

อุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามทิศทาง
ด้วยเทคโนโลยีซีมอส

THE MAGNETOTRANSISTOR FOR 3-AXIS MAGNETIC FIELD MEASUREMENT
BASED ON CMOS TECHNOLOGY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-D-018-001

อุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามทิศทาง
ด้วยเทคโนโลยีซีมอส

THE MAGNETOTRANSISTOR FOR 3-AXIS MAGNETIC FIELD MEASUREMENT
BASED ON CMOS TECHNOLOGY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-D-018-001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE MAGNETOTRANSISTOR FOR 3-AXIS MAGNETIC FIELD MEASUREMENT
BASED ON CMOS TECHNOLOGY



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

KMITL-2016-EN-D-018-001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามทิศทาง
ด้วยเทคโนโลยีซีมอส

Thesis Title The Magnetotransistor for 3-axis Magnetic Field Measurement Based on
CMOS Technology

นักศึกษា นายชนะ สิริภัทรพงศ์พันธ์

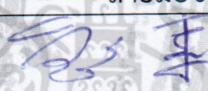
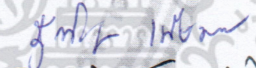
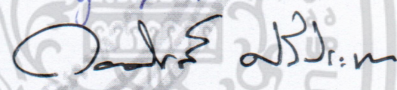
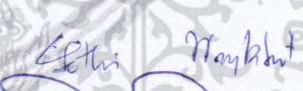

รหัสประจำตัว 54610128

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล


หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-D-018-001

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิสุทธิ	รัฐรุ่งเรือง	
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	นิยมเจริญ	
ดร.กอบศักดิ์	ศรีประภา	
ผศ.ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
รศ.ดร.เต็มพงษ์	เพ็ชรกุล	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 2 ธันวาคม พ.ศ. 2558 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำในได้ประโยชน์ด้านการค้า
คุณบัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 2 ธันวาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์สำหรับการตรวจจับ สนามแม่เหล็กสามทิศทางด้วยเทคโนโลยีซีมอส
นักศึกษา	นายชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์
รหัสนักศึกษา	54610128
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ อุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามทิศทางด้วยเทคโนโลยีกระบวนการผลิตซีมอส อุปกรณ์ถูกพัฒนาสำหรับการใช้พลังงานที่น้อยลงและสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กสามทิศทางด้วยอุปกรณ์เพียงตัวเดียว กลไกการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามทิศทางอาศัยการเบี่ยงเบนและการรวมตัวใหม่ของพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสและกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB}) โครงสร้างประกอบด้วย อิมิตเตอร์หนึ่งชั้นสร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิดพี คอลเลคเตอร์สี่ชั้นสร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเบสสี่ชั้นสร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยชั้นทั้งหมดสร้างบนฐานรองชนิดเอ็น การทำงานของอุปกรณ์อาศัยผลของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำแรงกระทำต่อพาหะในการเคลื่อนที่ทั้งสี่ด้านจากขั้วอิมิตเตอร์ไปที่ขั้วคอลเลคเตอร์และขั้วเบส การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามทิศทางสามารถเกิดขึ้นได้ในรูปแบบการทำงานแยกขั้วกระแสและการรวมกระแส การออกแบบและกระบวนการผลิตอาศัยเทคโนโลยีการผลิตซีมอสสำหรับการออกแบบที่มีความกว้างอิมิตเตอร์ขนาดเล็ก, การแยกส่วนของกระแสการฉีดพาหะทั้งสี่ด้านและสามารถสร้างร่วมกับวงจรรวมได้ จากการศึกษาการตอบสนองแม่เหล็กแบบตัวเดียวและแบบรวม ที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ 10 mA มีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบสัมพัทธ์ในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x , B_y และ B_z ในช่วง 1-3 %/T ในการทดลองแบบรวมกระแสอิมิตเตอร์ถูกแบ่งเป็นส่วนมีส่วนมีการตอบสนองสนามแม่เหล็ก ทิศทาง B_x , B_y และ B_z ในช่วง 1-3 %/T การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถใช้ได้กับระบบบ่งบอกสถานะการเปิดและปิด (Proximity sensors) ที่มีการเข้ารหัสสนามแม่เหล็กเพื่อความปลอดภัยสูงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The Magnetotransistor for 3-axis Magnetic Field Measurement Based on CMOS Technology
Student	Mr. Chana Leepattarapongpan
Student ID	54610128
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Toempong Phetchakul

ABSTRACT

This research presents a magnetotransistor for 3-axis magnetic field measurement based on CMOS technology. The device was developed to be consuming low energy while being able to detect magnetic field in 3 directions in a single device. The mechanism of this device is based on carrier recombination-deflection effect causing the difference in base and collector currents (ΔI_{CB}). The structure of this device consists of one emitter, four collectors and four bases. Both emitter and collector are p-type semiconductor, whereas base and substrate are n-type semiconductor. The operating principle of the magnetotransistor is based on the force acting upon carriers traveling from emitter to collector and base terminals as a result of magnetic field induction. The changing current of the device during detect magnetic field in 3 directions can be described in single and merge mode. The device was designed and fabricated using CMOS technology to have small emitter width, 4 separate carrier injection current sides and possible integration with integrated circuits. The experiments were performed in single and merge modes, at emitter bias 10mA in B_x , B_y , B_z directions. The result shows the sensitivity of device in range of 1-3%/T in single and merge mode. The magnetotransistor can be applied within a system which incorporate proximity sensors and magnetic field encoding scheme in order to achieve higher level of security.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล และดร.อัมพร โพธิ์ไย ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะตลอดจนอบรมสั่งสอนและให้ความอนุเคราะห์ในทุกๆ ด้านจนกระทั่งงานวิจัยนี้บรรลุตามเป้าหมายที่ได้ตั้งไว้

ขอขอบคุณนักวิจัยของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ดร.พุทธพล เพ็งพัด, คุณอาคม ศรีหาเพท และ คุณนริชพันธ์ เป็นผลดี สำหรับการร่วมการทำงานในการจำลอง, การออกแบบอุปกรณ์ และกระบวนการผลิต และนักวิจัยอีกหลายท่านให้ความช่วยเหลือในการปฏิบัติงานทุกด้าน และศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตและวัดผลทดลอง

ขอขอบคุณ ดร.วีระ เพ็งจันทร์ สจล. สำหรับให้คำแนะนำตลอดในการศึกษาวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับ บิดา มารดา ที่ให้ความรัก ความเมตตา อบรมสั่งสอน เป็นกำลังใจ และสนับสนุนทางการเรียนแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด สุดท้ายนี้ขอขอบคุณภรรยา อมรรวรรณ พงศาภินันท์ ที่เป็นผู้คิดและกำลังใจที่ดีตลอดมา จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ และสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ซึ่งเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัย จนกระทั่งจบการศึกษา

ชนะ สิริภัทรพงศ์พันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 สมมุติฐานการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	6
2.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (HALL Effect).....	6
2.2 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Magnetic sensors).....	11
2.2.1 อุปกรณ์ฮอลล์ (HALL device).....	11
2.2.2 แมกนีโตรีซิสเตอร์ (Magnetoresistor).....	16
2.2.3 แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode).....	17
2.2.4 มอสเฟสชนิดแยกขั้วเดรน (MAGFET).....	20
2.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor).....	21
2.3.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวตั้ง.....	22
2.3.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน.....	24
2.3.3 กลไกการเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้า.....	25
2.3.4 กลไกผลของกระแสการฉีดพาหะ.....	30
2.4 คุณสมบัติทั่วไปของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง.....	40
3.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา.....	40
3.2 การจำลองการทำงานแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา.....	43
3.2.1 การจำลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง.....	43
3.2.2 การจำลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวนอน.....	45
3.3 การออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในการตอบสนองสามทิศทาง.....	46
3.3.1 โครงสร้างและการตอบสนองสนามแม่เหล็ก B_z	46
3.3.2 การตอบสนองสนามแม่เหล็ก B_x และ B_y	48
3.3.3 การออกแบบลวดลายสำหรับกระเจกต้นแบบ.....	49
3.4 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์.....	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	56
4.1 คุณสมบัติรอยต่อของแมกนีโตทรานซิสเตอร์.....	56
4.2 วงจรการวัดทดลอง.....	57
4.3 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบตัวเดียว (Single mode).....	57
4.3.1 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x ที่กระแสमितเตอร์ค่าต่างๆ.....	57
4.3.2 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x	62
4.3.3 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y ที่กระแสमितเตอร์ค่าต่างๆ.....	63
4.3.4 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y	64
4.3.5 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z ที่กระแสमितเตอร์ค่าต่างๆ.....	65
4.3.6 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z	67
4.4 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบรวม (Merge mode).....	67
4.4.1 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x และ B_x ที่กระแสमितเตอร์ค่าต่างๆ..	67
4.4.2 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x และ B_x	70
4.4.3 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y และ B_y ที่กระแสमितเตอร์ค่าต่างๆ...71	71
4.4.4 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y และ B_y	73
4.4.5 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z และ B_z ที่กระแสमितเตอร์ค่าต่างๆ...73	73
4.4.6 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z และ B_z	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

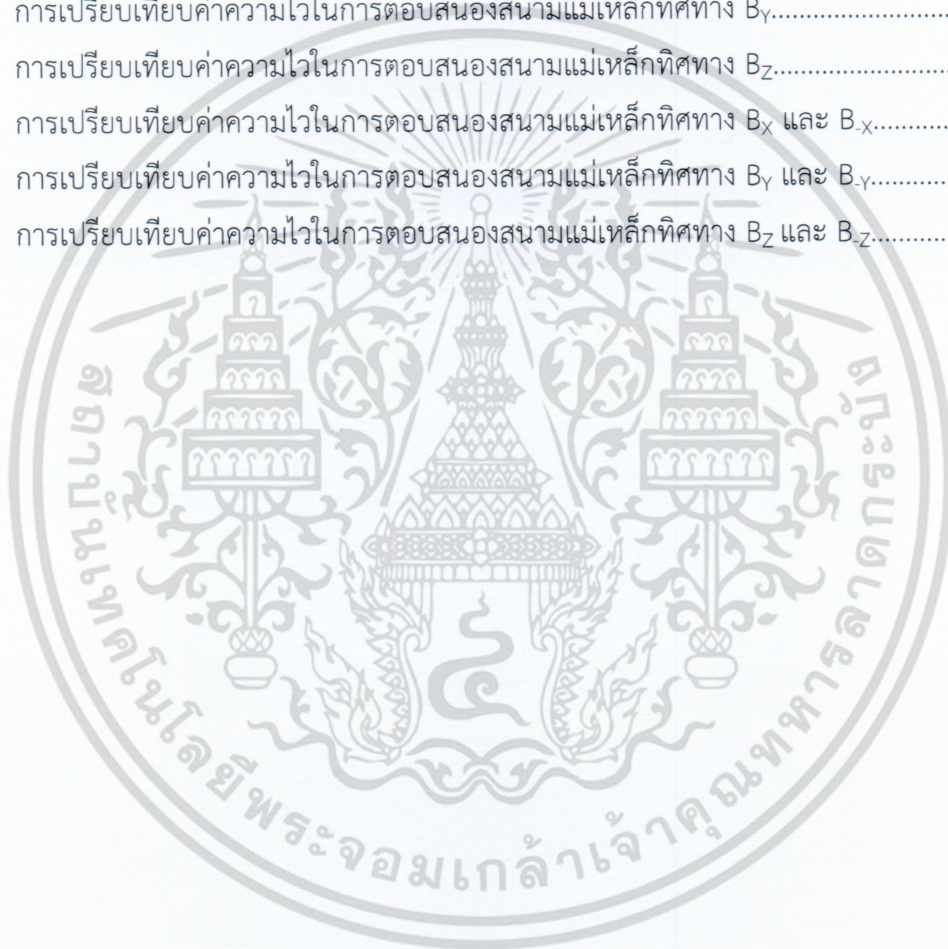
	หน้า
4.5 ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์.....	76
4.6 การประยุกต์ใช้งานแมกนีโตทรานซิสเตอร์.....	76
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	79
เอกสารอ้างอิง.....	81
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	84
ประวัติผู้เขียน.....	113



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดต่างๆ.....	2
2.1 รายละเอียดคุณลักษณะของเซนเซอร์ในทางอุดมคติ.....	39
4.1 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x	62
4.2 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y	65
4.3 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z	67
4.4 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x และ B_x	71
4.5 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y และ B_y	73
4.6 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z และ B_z	75



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	6
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค.....	8
2.3 ด้านตัดขวางโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์.....	11
2.4 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง.....	13
2.5 โครงสร้างด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง.....	13
2.6 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน (ก) ด้านบนและ(ข) ด้านตัดขวาง.....	14
2.7 โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสเตอร์ (ก) แบบขนานและ(ข) แบบวงกลม.....	17
2.8 ทิศทางกระแสไฟฟ้าของแมกนีโตไดโอดกับปริมาณการรวมตัวใหม่ (ก) ไม่มีสนามแม่เหล็กและ(ข) มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน.....	18
2.9 คุณสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของแมกนีโตไดโอดกับปริมาณการรวมตัวใหม่.....	18
2.10 กลไกของแมกนีโตไดโอดกับการรวมตัวใหม่ที่พื้นผิว (ก) โครงสร้างของ pin diode (ข) คุณสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า.....	19
2.11 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสองชนิด (ก) SOS และ(ข) CMOS.....	19
2.12 โครงสร้างของมอสเฟตชนิดแยกขั้วเดรน.....	20
2.13 (ก) โครงสร้างมอสเฟตชนิดแยกขั้วเดรนในการไบอัสกระแสไฟฟ้าและ(ข) อุปกรณ์ในการทำงานเพื่อเกิดความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์.....	21
2.14 ด้านตัดขวางโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง.....	23
2.15 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน.....	24
2.16 ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ (โอล) (ก) $B_z = 0$ และ (ข) $B_z > 0$	25
2.17 โครงสร้างด้านตัดขวางของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบแยกคอลเลคเตอร์.....	26
2.18 โครงสร้างด้านตัดขวางของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบแยกขั้วคอลเลคเตอร์บนพื้นฐานเทคโนโลยีวงจรรวมไบโพลาร์.....	27
2.19 ภาพด้านบนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบแยกขั้วคอลเลคเตอร์.....	27
2.20 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดแนวนอนในเทคโนโลยีซีมอส (ก) ด้านตัดขวาง (ข) รูปภาพด้านบน.....	28
2.21 (ก) พื้นที่เบสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ด้านตัดขวางและ (ข) เส้นความเข้มของกระแสไฟฟ้า.....	29

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22	โครงสร้างที่ต่อร่วมกันของอุปกรณ์ออลต์และไปโพลาร์ทรานซิสเตอร์สองตัว.....30
2.23	แมกนีโตทรานซิสเตอร์แวนอนชนิด พีเอ็นพี แบบแยกขั้วคอลเลคเตอร์ (ก) ด้านบน และ (ข) ด้านตัดขวาง.....31
2.24	ประสิทธิภาพการฉีดระดับต่ำ (ก) รอยต่อ P ⁺ -n ถูกต่อในแนวขนานกับไบโอดซ็อกเก็ต (ข) การแยกการลัดวงจรรอยต่อ P ⁺ -n เป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก (โลหะ-n ⁺).....32
2.25	(ก) วงจรเสมือนของการลัดวงจรอิมิตเตอร์ และ (ข) คุณสมบัติความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้า.....32
2.26	การเกิดขึ้นของแรงดันฮอลล์บริเวณรอยต่ออิมิตเตอร์-เบส.....33
2.27	อัตราส่วนของกระแสคอลเลคเตอร์ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ดังรูปที่ 2.26.....34
2.28	คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ในทางอุดมคติ.....37
2.29	ฮิสเตอร์รีซิสสัญญาณเอาท์พุทที่แตกต่างไปจากค่าเดิม.....38
3.1	โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา.....40
3.2	ทิศทางการไหลไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา.....41
3.3	ทิศทางการเคลื่อนที่เปียงเบนของพาหะ (ก) การตอบสนองของสนามแม่เหล็กแนวตั้งและ (ข) การตอบสนองของสนามแม่เหล็กแวนอน.....42
3.3	การวิเคราะห์พื้นที่การเปียงเบนของพาหะในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งและแวนอน.....42
3.5	การจำลองการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (ก) ไม่มีสนามแม่เหล็กและ (ข)การตัดผ่านสนามแม่เหล็กแนวตั้ง.....44
3.6	กราฟการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาท์พุทและความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (ก) สนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทางแนวตั้งและ(ข) สนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทางแวนอน.....44
3.7	การจำลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กในทิศทางแวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (ก) B _y และ (ข) B _x45
3.8	กราฟการจำลองเปรียบเทียบการตอบสนองสนามแม่เหล็ก B _y และ B _x ที่ความสัมพันธ์ (ก) กระแสเบสกับกระแสอิมิตเตอร์ (ข) กระแสคอลเลคเตอร์กับกระแสอิมิตเตอร์.....46
3.9	โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามทิศทาง.....47

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 การทำงานอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก) ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านและ (ข) การตัดผ่านของสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z	48
3.11 การทำงานแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก) การตัดผ่านสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y และ (ข) การตัดผ่านสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x	49
3.12 การออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ด้วยโปรแกรม L-Edit.....	49
3.13 การออกแบบเลย์เออร์ต่างๆในกระบวนการผลิตกระจกต้นแบบสำหรับกระบวนการ สร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์.....	50
3.14 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก) สร้างชั้นฟิล์ม, (ข) สร้างลวดลายวงจร Active Area, (ค) การกัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์, (ง) การลอกน้ำยาไวแสง, (จ) การสร้าง ชั้นออกไซด์หนาและ (ฉ) การกัดชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์.....	51
3.15 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก) การกัดชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์และ (ข) การสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์.....	52
3.16 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก) กระบวนการสร้างลวดลายวงจร, (ข) กระบวนการยิงฝังประจุโบรอน, (ค) กระบวนการสร้างลวดลายวงจร และ (ง) กระบวนการยิงฝังประจุฟอสฟอรัส.....	52
3.17 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก) กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มออกไซด์, (ข) กระบวนการสร้างลวดลายวงจร Contact, (ค) กระบวนการกัดชั้นฟิล์มออกไซด์, (ง) กระบวนการลอกน้ำยาไวแสง, (จ) กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มโลหะอะลูมิเนียมและ (ฉ) กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มโลหะไททาเนียมและไททาเนียมไนไตรด์.....	53
3.18 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก) กระบวนการสร้างลวดลายวงจรขั้วโลหะ, (ข) กระบวนการกัดชั้นโลหะ, (ค) กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์และการสร้าง ลวดลายวงจร PAD และ (ง) กระบวนการกัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์และกระบวนการซินเตอร์....	54
3.19 ภาพถ่ายแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก) ภาพถ่ายด้านบนด้วยกล้องไมโครสโคปและ (ข) แมกนีโตทรานซิสเตอร์ในบรรจุภัณฑ์.....	55
4.1 คุณสมบัติรอยต่อของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่รอยต่อต่างๆ (ก) (E-B1, E-C1), (ข) (E-B2, E-C2), (ค) (E-B3, E-C3) และ (ง) (E-B4, E-C4).....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	วงจรรวบรวมการวัดทดลองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก) การวัดทดลองแบบตัวเดียว (Single mode) และ (ข) การทดลองแบบรวม (Merge mode).....57
4.3	การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x ในการวัดแบบตัวเดียว (Single mode) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสจำกัดเตอร์ 1 mA.....58
4.4	ทิศทางการเคลื่อนที่ของโฮลขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน (ก) E-B1-C1, (ข) E-B2-C2, (ค) E-B3-C23 และ (ง) E-B4-C4.....59
4.5	ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะ (โฮล) ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน (ก) E-B1-C1 (ข) E-B2-C2 (ค) E-B3-C23 และ (ง) E-B4-C4.....60
4.6	พาหะ(โฮล)เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในมุมที่กว้างขึ้นตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (ก) E-B2-C2และ (ข) E-B4-C4.....60
4.7	การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x ในการวัดแบบตัวเดียว (Single mode) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสจำกัดเตอร์ค่าต่างๆ (ก) 5 mA, (ข) 10mA และ (ค)40mA.....61
4.8	การเพิ่มปริมาณการฉีดพาหะ(โฮล)เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสจำกัดเตอร์ (ก) E-B2-C2 และ (ข) E-B4-C4.....62
4.9	การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y ในการวัดแบบตัวเดียว (Single mode) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสจำกัดเตอร์ค่าต่างๆ (ก) 1mA, (ข) 5 mA (ค) 10mA และ (ง) 40mA.....63
4.10	การเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะ (โฮล) ในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y (ก) E-B1-C1, (ข) E-B2-C2 (ค) E-B3-C23 และ (ง) E-B4-C4.....64
4.11	การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z ในการวัดแบบตัวเดียว (Single mode) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสจำกัดเตอร์ (ก) 1 mA, (ข) 5mA, (ค) 10mA และ (ง) 40mA65
4.12	การเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะ (โฮล) ในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z (ก) E-B1-C1, (ข) E-B2-C2 (ค) E-B3-C23 และ (ง) E-B4-C4.....66
4.13	การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x ในการวัดแบบรวม (Merge mode) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสจำกัดเตอร์ 5 mA.....68

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14	ทิศทางการเคลื่อนที่ของโพลขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน.....69
4.15	การเคลื่อนที่ของพาหะในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x (ก) สนามแม่เหล็กทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า (ข) สนามแม่เหล็กทิศทาง B_x69
4.16	การเคลื่อนที่ของพาหะในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x70
4.17	การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x และ B_x ในการวัดแบบรวม (Merge mode) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสลิมิตเตอร์ค่าต่างๆ (ก) 10 mA และ (ข) 40 mA.....70
4.18	การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y และ B_y ในการวัดแบบรวม (Merge mode) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสลิมิตเตอร์ (ก) 5 mA, (ข) 10mA และ (ค) 40mA.....71
4.19	การเคลื่อนที่ของพาหะในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y และ B_y (ก) สนามแม่เหล็กทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า (ข) สนามแม่เหล็กทิศทาง B_y และ (ค) สนามแม่เหล็กทิศทาง B_y72
4.20	การเคลื่อนที่ของพาหะในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y และ B_y (ก) สนามแม่เหล็กทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า (ข) สนามแม่เหล็กทิศทาง B_y และ (ค) สนามแม่เหล็กทิศทาง B_y73
4.21	การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z และ B_z ในการวัดแบบรวม (Merge mode) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสลิมิตเตอร์ 40 mA.....74
4.22	ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะในการตอบสนองสนามแม่เหล็ก (ก) B_z และ (ข) B_z74
4.23	การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x , B_y และ B_z ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์.....75
4.24	คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นในการตอบสนองสนามแม่เหล็ก.....76
4.25	ต้นแบบเซนเซอร์วัดระยะทางสำหรับตรวจสอบสถานะการเปิด-ปิดโดยวิธีการเข้ารหัสแม่เหล็ก (MEPS) (ก) แมกนีโตทรานซิสเตอร์ในบรรจุภัณฑ์ (ข) แมกนีโต-บนลายวงจร และ (ค) แมกนีโตทรานซิสเตอร์ในการประยุกต์ใช้งานวัดระยะทาง.....77
4.26	ไดอะแกรมการทำงานของเครื่องบอกสถานะการเปิดและปิด.....77
4.27	เครื่องบอกสถานะเปิดและปิดของประตู (ก) การติดตั้งเครื่องบอกสถานะ และ (ข) สถานะส่งสัญญาณที่หน้าจอโทรศัพท์.....78

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีการวิจัยพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆอย่างต่อเนื่อง เช่น อุปกรณ์ตรวจจับแสง อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ฯลฯ การพัฒนาโครงสร้างและการทำงาน เพื่อนำมาเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจึงเป็นอีกบทบาทของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก เช่น ไดโอด, ทรานซิสเตอร์, โมสเฟต ฯลฯ โดยอุปกรณ์เหล่านี้อาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างประจุพาหะและความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีบทบาทและถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากมีโครงสร้างขนาดเล็ก, สัญญาณรบกวนที่เอาต์พุตมีค่าต่ำ, สามารถใช้งานกับวงจรรวมได้และสามารถประยุกต์ใช้งานต่างๆได้หลากหลาย [1-3]

ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่นำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กเรียกอีกแบบว่า แมกนีโตทรานซิสเตอร์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (vertical magnetotransistor) และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน (lateral magnetotransistor) โดยปกติแล้วโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ประกอบด้วยคอลเลคเตอร์สองขา, อิมิตเตอร์หนึ่งขาและขั้วเบสสองขา ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ ทำให้พาหะเบี่ยงเบนเกิดความไม่สมดุลของกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสการทำงานอิมิตเตอร์ กลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์จะขึ้นอยู่กับ การเบี่ยงเบนของพาหะและอัตราการฉีดพาหะของอิมิตเตอร์ [1-8] โครงสร้างปกติของ แมกนีโต-ทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง (ΔI_C) กลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองขึ้นอยู่กับ การเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) [1-8] แต่โครงสร้าง ปกติของ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กได้เพียงทิศแนวตั้ง, การให้ไบอัสที่ยุ่งยากและมีขนาดใหญ่ [1-3]

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิด

พาหะเคลื่อนที่ตามแนวนอน ศึกษาโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ เพื่อให้มีประสิทธิภาพการตรวจจับสนามแม่เหล็กในสามทิศทาง B_x , B_y , B_z โดยอุปกรณ์นี้มีจุดเด่นสามารถตรวจจับ

สนามแม่เหล็กได้ด้วยอุปกรณ์เพียงตัวเดียวซึ่งแตกต่างอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กทั่วไปที่ภายในมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์สามตัวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามทิศทาง อีกทั้งอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์นี้ใช้พลังงานที่น้อยลง แมกนีโตทรานซิสเตอร์ใช้เทคโนโลยีซีมอสในการออกแบบและกระบวนการสร้าง สำหรับการต่อร่วมกับวงจรรวมต่อไปได้ โครงสร้างประกอบด้วย หนึ่งขั้วอิมิตเตอร์, สี่ขั้วคอลเลคเตอร์ และสี่ขั้วเบส กลไกการทำงานอาศัยการฉีดพาหะในสี่ทิศทางสำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กเพื่อให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และเบส (ΔI_{CB}) กลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และเบสขึ้นอยู่กับความเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และกลไกพาหะที่รวมตัว (recombination) ในเบส สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ ในสามทิศทาง, มีขนาดเล็ก, การไบอัสที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานและสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่โครงสร้างต่างๆ

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดต่างๆ

Magnetic sensors	HALL	Diode	Transistor	Squid	GMR
Sensitivity [T^{-1}]	1V/AT	1-5	1-10	100	5%
Magnetic field range (gauss)	10-10 ⁶	10-10 ³	10 ⁻² -10 ³	10 ⁻⁸ -10 ⁴	10 ⁻¹ -10 ⁸
Supply current or voltage	1mA	1-5V	1-10mA	5V	1-5mA
Hysteresis (%FS)	1	1	1	1	-
Operating Temperature (°C)	-20-120	0-120	-20-120	>100	-
Linearity (%FS)	1	1	1	-	-
Paper reference	[1, 3]	[1,3]	[1,3]	[1,3]	[1,3]

หมายเหตุ %FS คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงที่สเกลสูงสุดในการวัดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์

สำหรับงานวิจัยในอดีตที่มีการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดแมกนีโต

ทรานซิสเตอร์เริ่มจาก ผลงานในปี ค.ศ. 1986 ของ R.S. Popovic และ Rolf Widmer [7]

ทำการศึกษาเกี่ยวกับ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ด้วยเทคโนโลยีซีมอส วิเคราะห์กลไกการทำงานของ

อุปกรณ์การเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier Deflection) และกลไกกระแสการฉีดพาหะอิมิตเตอร์

(Modulation Current Injection) ผลงานในปี ค.ศ. 1990 Lj. Ristic, M.T. Done และ M.

Paranjape นำเสนอแมกนีโตทรานซิสเตอร์ด้วยเทคโนโลยีซีมอส 3 ไมครอนที่สามารถตรวจจับ

สนามแม่เหล็กได้ในทิศทางขนานและแนวตั้งกับผิวหน้าของอุปกรณ์ สามารถตรวจวัด ค่า

สนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-300 mT มีค่าการตอบสนองสนามแม่เหล็ก 45%/T [4] ผลงานในปี ค.ศ.

1997 ของ Agnes Nagy และ Hector Trujillo Chiang นำเสนอแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่สามารถ

ตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในสามทิศทาง B_x , B_y , B_z โดยใช้ขั้วคอลเลคเตอร์และเบสซึ่งอาศัยการ

เบี่ยงเบนของพาหะ ได้ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก 2.5%/T [5] ผลงานในปี ค.ศ. 2005

ของ R.D. Tikonov นำเสนอ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีขั้วเบสถูกสร้างในบ่อ well ตรวจจับ

สนามแม่เหล็กในหนึ่งทิศทางขนานกับผิวหน้าของอุปกรณ์ อุปกรณ์ถูกสร้างให้มีค่าความไวในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจจับสนามแม่เหล็กสูงมีค่า 2000 %/T [9] ผลงานในปี ค.ศ. 2009 ของ R.D. Tikonov และคณะ นำเสนอแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีการตรวจจับสนามแม่เหล็กหนึ่งทิศทาง มีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูงและมีค่าแรงดันออฟเซตที่ต่ำคือน้อยกว่า 1mV [10] เมื่อไม่นานมานี้ ผลงานในปี ค.ศ. 2010 ของ R.D. Tikonov และคณะ นำเสนอแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น -พี-เอ็น โดยกลไกการทำงานของอุปกรณ์สามารถค้นพบปรากฏการณ์ความแตกต่างของการรวมตัวใหม่ (Magnetoeconcentration effect) ทำให้อุปกรณ์มีค่าความไวที่สูงขึ้น [11] และ ผลงานวิจัยในปี ค.ศ. 2013 ของ V.V. Amelichev และคณะ นำเสนอโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีขั้วคอลเลคเตอร์สามขั้ว ขั้วเบสถูกสร้างในบ่อ well ทำให้มีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูงมีค่า 100%/T สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย

1.2 ความมุ่งหมายและ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างประจุพาหะและความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก
2. ศึกษาและออกแบบขั้นตอนกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ด้วยเทคโนโลยีซีมอส
3. ศึกษาการจำลองโครงสร้างและกลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก
4. ศึกษาโครงสร้างและการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในสามทิศทาง
5. วิเคราะห์คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์
6. ศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์, ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและความแตกต่างของกระแสไฟฟ้า
7. ศึกษาค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

1.3 สมมุติฐานการศึกษา

1. แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งและแนวนอนได้โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และเบส (ΔI_{CB}) กลไกในการเกิดความแตกต่างขึ้นอยู่กับ การเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier deflection) และกระแสเนื่องจากการรวมตัวใหม่ของพาหะ (Carrier recombination)
2. แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสสามารถพัฒนาเพื่อใช้งานการตรวจจับสนามแม่เหล็กในสามทิศทางคือ B_x , B_y และ B_z โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB})

3. แมกนีโตทรานซิสเตอร์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามทิศทางสามารถออกแบบและ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สร้างได้ด้วยเทคโนโลยีซีมอส กลไกการทำงานอาศัยความสัมพันธ์ของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับความแตกต่างของกระแสไฟฟ้า ระหว่างพาหะที่รวมตัว (Carrier recombination) ในเบสเป็นกระแสเบสและพาหะที่เบี่ยงเบนเป็นกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB}) กลไกในการเกิดความแตกต่างขึ้นอยู่กับ การเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier deflection)
4. ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสการทำงานอิมิตเตอร์
 5. แมกนีโตทรานซิสเตอร์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามทิศทาง สามารถ พัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ในงานระบบความปลอดภัยเพื่อบ่งบอกสถานะการเปิด - ปิดของอุปกรณ์ต่างๆได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีบทบาทมากที่สุดและถูกนำมาใช้งานต่างๆได้หลากหลาย การใช้ประโยชน์จากโครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เพื่อประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจึงเป็นอีกหนึ่งบทบาทของทรานซิสเตอร์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็ก ได้ในสามทิศทางคือ B_x , B_y และ B_z โดยอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ การออกแบบและกระบวนการผลิตอุปกรณ์อาศัยเทคโนโลยีซีมอส กลไกการทำงานอาศัยการฉีดพาหะในสี่ทิศทางเพื่อเกิดการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนและการรวมตัวใหม่ของพาหะเพื่อให้สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในสามทิศทางและให้เกิดการใช้กระแสไบอัสอิมิตเตอร์ที่น้อยลงตรงข้ามกับค่าความไวของอุปกรณ์ที่มีค่าสูงขึ้น

1.5 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กในสามทิศทาง
2. ศึกษาสมบัติพื้นฐานกลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์
3. ศึกษากระบวนการจำลองการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์
4. ทำการออกแบบและสร้างกระเจกต้นแบบอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์
5. ทำการศึกษาและออกแบบขั้นตอนกระบวนการสร้างอุปกรณ์ด้วยเทคโนโลยีซีมอส
6. ทำการวัดผลคุณสมบัติรอยต่อและกระแส-แรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์
7. ทำการวัดผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กในสามทิศทาง B_x , B_y และ B_z
8. ทำการศึกษาสมบัติเฉพาะด้านต่าง ๆ ของอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. สามารถพัฒนาแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้สามทิศทาง
2. สามารถออกแบบกระบวนการผลิตและผลิตอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์
3. สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก, ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์และค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก
4. สามารถวิเคราะห์สมบัติความเป็นเชิงเส้นและฮิสเตอร์รีซิสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ได้

โดยเนื้อหาในวิทยานิพนธ์แบ่งเป็นบทต่างๆ ตามรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงประเด็นของปัญหา วัตถุประสงค์ สมมติฐาน ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อทำความเข้าใจภาพรวมทั้งหมดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ กล่าวถึง หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์ และชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก เช่น อุปกรณ์ฮอลล์, แมกนีโตริซิสเตอร์, แมกนีโตไดโอดและแมกนีโตทรานซิสเตอร์ รวมทั้งกลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์คือ กลไกการเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าและกลไกผลของกระแสการฉีดพาหะ สุดท้ายบรรยายถึงคุณสมบัติพื้นฐานของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง กล่าวถึง การออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กในสามทิศทาง บรรยายถึงมิติโครงสร้างของอุปกรณ์รวมทั้งขั้นตอนการออกแบบกระจกต้นแบบ อธิบายขั้นตอนการผลิตแมกนีโตทรานซิสเตอร์จนเสร็จสมบูรณ์

บทที่ 4 การทดลองและวิเคราะห์ผล กล่าวถึง คุณสมบัติรอยต่อของแมกนีโตทรานซิสเตอร์, แสดงผลการทดลองแบบเดี่ยว (Single mode) และการทดลองแบบรวม (Merge mode) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x , B_y และ B_z การทดลองเปรียบเทียบค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทางต่างๆ

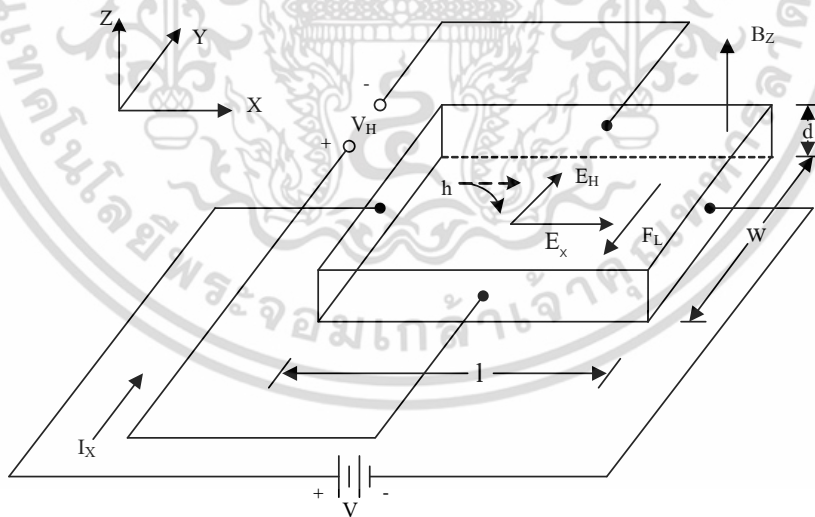
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ เป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากบทที่ 4 โดยนำผลการทดลองทั้งหมดมาสรุปเพื่อให้ผลการทดลองที่ได้เกิดความชัดเจนขึ้นรวมถึงข้อเสนอนแนะเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (HALL Effect)

ในการศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์นั้นสามารถอธิบายการทำงานจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถพิจารณาจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำ และให้สนามแม่เหล็กทำมุมตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแส ทำให้มีแรงลอเรนซ์เกิดขึ้นในทิศที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแส และทิศทางการไหลของสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์

การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นการยืนยันแนวคิดที่เป็นไปได้เกี่ยวกับชนิดของพาหะประจุ (charge carrier) ทั้งสองชนิด คือ อิเล็กตรอน และโฮล ที่มีอยู่จริงในสารกึ่งตัวนำ ผลจากการทดลองเรื่องนี้ทำให้สามารถวัด และคำนวณค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำได้ ทั้งยังนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์ อื่นๆ ได้ แท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังรูปที่ 2.1 นำไปต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันที่มีค่าความต่างศักย์ V โวลต์ ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส (current density) J_x ไหลในทิศ $+x$ และให้สนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น (flux density) B_z ตัดผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศ $+z$



รูปที่ 2.1 การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี [3]

โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากและมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นบวกเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าในทิศทางการไหลของกระแส ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว drift velocity (v_x) ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทาง $+x$ และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_z ตัดผ่านในทิศตั้งฉากกับกระแสจะเกิดมีแรงลอเรนซ์กระทำต่อโฮลด้วย ตามสมการ

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

โดยที่ \overline{F}_L คือ แรงลอเรนซ์มีขนาดเป็น

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

โดยที่ e คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน, v_x คือ ความเร็วดริฟท์ของพาหะ และ B_z คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กทิศทาง Z

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

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

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

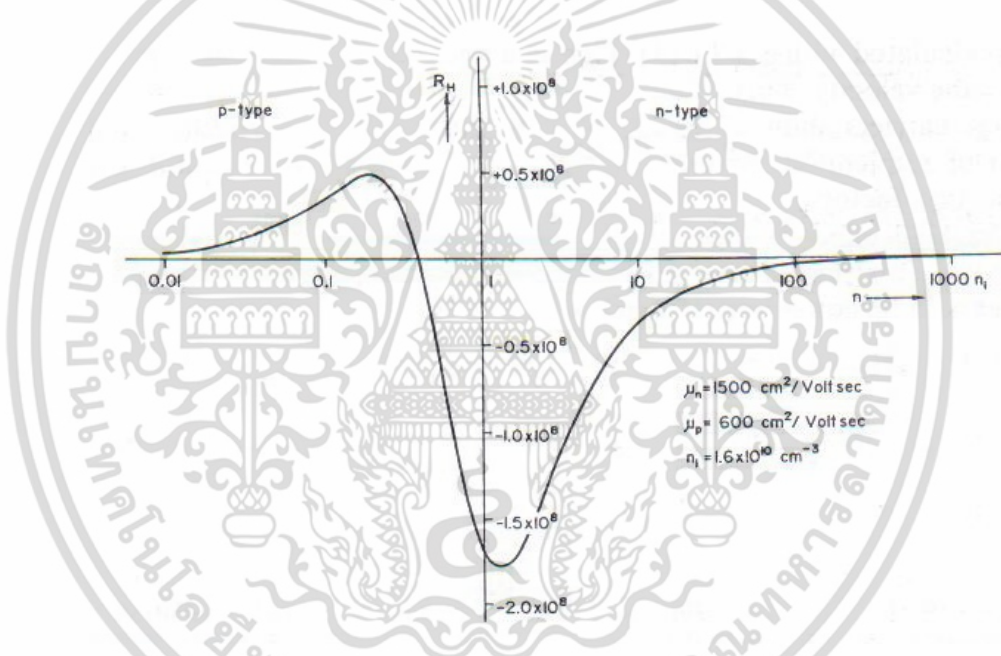
$$E_H = \frac{J_x.B_z}{p.e}$$

ดังนั้นจะได้

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

โดย R_H คือ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)

รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดอินทรีนซิกซึ่งเปลี่ยนแปลงสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าในการโด๊ประดับต่ำสามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่มีค่าสูงได้ แต่โดยส่วนมากแล้วจะไม่เลือกใช้ในการโด๊ประดับต่ำสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์ฮอลล์จะเป็นผลให้แรงดันฮอลล์ที่ได้มีค่าลดลง โดยค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเลือกใช้ได้จากกราฟคำนวณซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำ [3]



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก [3]

จากรูปที่ 2.1 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

หรือ

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

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

ความหนาแน่นของโฮล คือ

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

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

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

จาก

ดังนั้นจะได้

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e.p.\mu_p} \quad (2.11)$$

จากสมการ (2.9), (2.10) และ (2.11) เห็นว่าการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญของแ่งสารกึ่งตัวนำได้ คือความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะได้เป็นอย่างดี ในทำนองเดียวกันกรณีที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แรงดันฮอลล์ (V_H) มีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือ มีค่าเป็นลบ และได้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ R_H แสดงดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นโดยการวัดแรงดันฮอลล์ ทำให้สามารถบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นสารชนิดเอ็นหรือชนิดพีได้ ผลตอบสนองของความไว (Sensitivity) คือ แรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแส และสมการค่าความไวสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.13)

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

โดยที่ G คือ พารามิเตอร์โครงสร้าง, d คือ ความหนาของสารกึ่งตัวนำ และ p คือปริมาณความหนาแน่นอะตอมสารเจือ

เห็นว่าค่าความไวที่สูงจะมีความหนาแน่นของประจุมีค่าต่ำ และฮอลล์เพลทจะต้องมีความหนาแน่นน้อยๆ ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าสุทธิ ในแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นผลของการรวมเวกเตอร์ของ E_H และ E_x ซึ่งไม่ได้มีทิศทางตรงไปตามแกน $+x$ แต่ทำมุม θ_H กับแกน $+x$ ดังรูปซึ่งมุม θ_H ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “มุมฮอลล์” (Hall angle) โดย

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

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

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

หรือ

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

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

จะได้

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

ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีนี้ที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ R_{HI} สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้โดย

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

โดย μ_H คือ สภาพความคล่องตัวของโฮล (Hall mobility) และ μ_{Hi} คือสภาพความคล่องตัวของโฮลในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับแลททิซ ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ (ionized impurity scattering) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ R_{Hi} แสดงได้ดังสมการที่ (2.16)

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

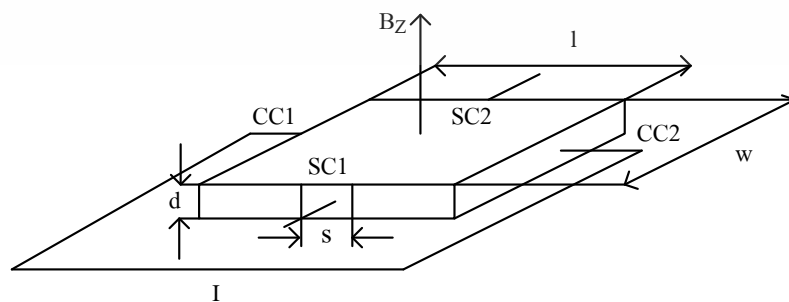
$$\text{และ } \mu_{Hi} = \frac{315\pi}{512} \mu_p = 1.93\mu_p \quad (2.17)$$

โดย μ_{Hi} คือสภาพความคล่องตัวของโฮลในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ

2.2 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Magnetic sensors)

2.2.1 อุปกรณ์ฮอลล์ (HALL device)

อุปกรณ์ฮอลล์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยทฤษฎีฮอลล์ (Hall Effect) โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยจากโครงสร้างแสดงรูปร่างอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีความหนาที่บาง โครงสร้างประกอบด้วย 4 ขั้วใช้งานคือ CC1, CC2, SC1 และ SC2 [3] ซึ่งแรงดันฮอลล์ (V_H) ถูกวัดที่ขั้ว SC1 และ SC2 โดยที่การไบอัสกระแสไฟฟ้าที่ขั้ว CC1 และ CC2 แรงดันฮอลล์สามารถหาได้ดังสมการที่ (2.18)



รูปที่ 2.3 ด้านตัดขวางโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เนื่องจากสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพิจารณาพฤติกรรมของพาหะอิเล็กตรอน และโฮล ซึ่งในกรณีอุปกรณ์ฮอลล์ที่อิเล็กตรอนมากกว่าโฮล ($n \gg p$) สามารถแสดงสมการแรงดันฮอลล์ ได้ดังนี้

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

โดยที่ r_n คือ พารามิเตอร์การกระเจิง (Scattering parameter)

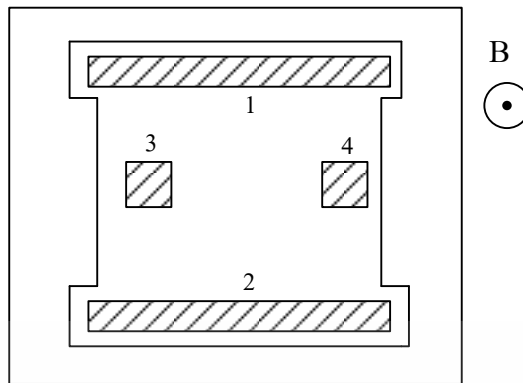
จากสมการที่ (2.18) และ (2.19) แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์โครงสร้าง G จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันฮอลล์ โดยที่พารามิเตอร์โครงสร้าง G สามารถประมาณดังสมการที่ (2.20)

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

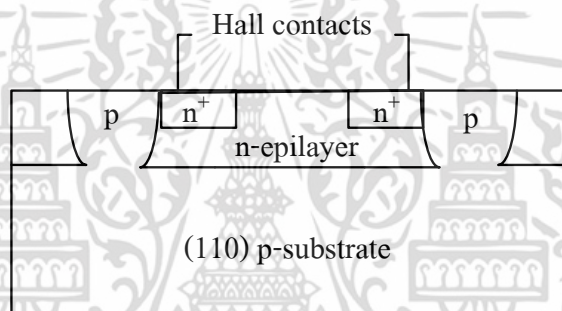
โดยในการออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์จะกำหนดให้ค่า $G = 1$ ซึ่งพารามิเตอร์โครงสร้างจะเท่ากับหนึ่งได้ ถ้าออกแบบให้ $l/w = 3$ และ $s/w < 1$ โดยตำแหน่งของขั้วเซนเซอร์คอนแทคจะออกแบบที่ระยะ $l/2$ [1]

ในปัจจุบันอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแบ่งได้ คือ อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งและแนวนอน [1-3] โดยรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 แสดงด้านบนและตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งชนิดเอ็น โดยสร้างบนฐานรองชนิดพี และสร้างด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ กระแส เคลื่อนที่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 และ 2 ขณะที่แรงดันฮอลล์ถูกวัดระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 และ 4 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และมีความหนาแน่นอิพิทาเซียล $5 - 10 \text{ } \mu\text{m}$ โดยที่ออกแบบมิติของเฟลทประมาณ $200 \times 200 \text{ } \mu\text{m}$ สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชั้นอิพิสามารถลดลงได้โดยใช้ วิธีการยิงฝังประจุ (ion implantation) ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้ขนาดของแผ่นอุปกรณ์ฮอลล์มีความสม่ำเสมอได้ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง [3]

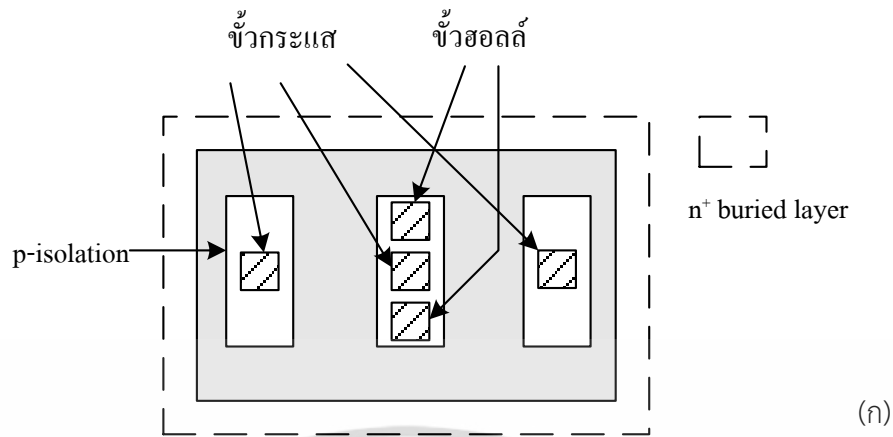


รูปที่ 2.5 โครงสร้างด้านตัดขวางของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง [3]

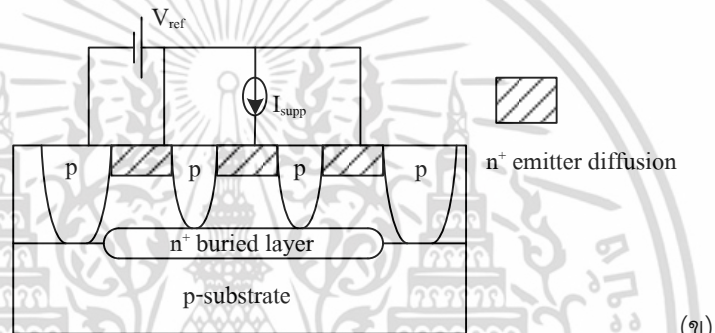
อุปกรณ์ฮอลล์นี้ใช้วัดตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งแต่สามารถประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอนได้โดยเรียกว่าอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน แสดงดังรูปที่ 2.6 โดยที่โครงสร้างนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นพื้นฐานที่จะสร้างเข็มทิศแม่เหล็ก โดยพื้นที่ของอิเล็กโทรดออกแบบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กประมาณ 41 V/AT โดยมีระดับสัญญาณรบกวน $1 \times 10^{-5} \text{ T/Hz}$ ที่ 40 Hz [3]

อุปกรณ์ฮอลล์ชนิดแนวตั้งและแนวนอนสามารถสร้างได้โดยกระบวนการสร้าง CMOS เช่น อุปกรณ์ฮอลล์สามมิติแบบเข็มทิศแม่เหล็กสร้างได้ใน เทคโนโลยี ระดับ $2 \mu\text{m}$ สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งสามทิศทาง (B_x, B_y, B_z) โดยการวัดอาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะในมุมเบี่ยงเบนต่างๆสามารถนำมาแสดงเป็นความหนาแน่นสนามแม่เหล็กได้ ข้อดีของอุปกรณ์ฮอลล์นี้คือมีชั้นเลเยอร์ที่บางมากประมาณ 100 \AA ทำให้มีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูงประมาณ $500 - 1,000 \text{ V/AT}$ แต่มีข้อเสีย คือ มีค่าสภาพความคล่องที่ต่ำ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.6 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แวนอน (ก) ด้านบน และ (ข) ภาคตัดขวาง [3]

คุณสมบัติของอุปกรณ์ฮอลล์ของค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Sensitivity) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญเพื่อบ่งบอกประสิทธิภาพของอุปกรณ์ฮอลล์สามารถหาได้โดยค่าความไวสัมบูรณ์ (Absolute sensitivity) และ ค่าความไวสัมพัทธ์ (Relative sensitivity) ค่าความไวสัมบูรณ์ของอุปกรณ์ฮอลล์สามารถหาได้โดยสมการที่ 2.21

$$S_A = \left| \frac{V_H}{B_z} \right| \cdot C \tag{2.21}$$

โดยที่ V_H คือแรงดันฮอลล์, B คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก และ C คือ เงื่อนไขการทำงาน เช่น อุณหภูมิ, ความถี่ และ กระแสไบอัส

สำหรับอุปกรณ์ฮอลล์ค่าความไวที่มีความสัมพันธ์กับกระแสและค่าความไวที่มีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการศึกษา โดยค่าความไวที่มีความสัมพันธ์กับกระแส (current-related sensitivity) ของอุปกรณ์สามารถหาได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_I = \frac{S_A}{I} = \left| \frac{1}{I} \cdot \frac{V_H}{B_Z} \right|, \quad V_H = S_I \cdot I \cdot B \quad (2.22)$$

โดยที่ I คือ กระแสไบอัสของอุปกรณ์ฮอลล์ หน่วยของ S_I คือ $\text{VA}^{-1}\text{T}^{-1}$ สามารถแสดงสมการได้โดย

$$S_I = G_H |R_H| / t \quad (2.23)$$

ในกรณีพื้นฐานรองเป็นเอ็กทรินซิกอย่างมาก สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวและสัมประสิทธิ์ได้โดย

$$S_I = G_H \cdot \frac{r_H}{qnt} \quad (2.24)$$

โดยที่ G_H คือ พารามิเตอร์โครงสร้าง, r_H คือแฟคเตอร์ฮอลล์ของพาหะส่วนมาก, n คือ ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนในฮอลล์เพลท และ t คือ ความหนาของเพลท

ค่าความไวที่มีความสัมพันธ์กับกระแสไม่ขึ้นกับวัสดุของเพลท ตั้งแต่ $r_H = 1$ นั่นคือไม่คำนึงถึงวัสดุ ค่าความไว S_I ระหว่าง 50 ถึง 500 $\text{VA}^{-1}\text{T}^{-1}$ ค่าความไวสูงสุด S_I คือ $S_I = 3100 \text{VA}^{-1}\text{T}^{-1}$ ซึ่งสอดคล้องกับค่า $N_S = 2 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ อย่างเช่นความหนาแน่นของประจุพาหะมีค่าต่ำในชั้นแอ็คทีฟของอุปกรณ์ฮอลล์จะไม่มีผลเพราะว่าความแข็งแรงภายในของประจุพาหะที่อยู่บนพื้นผิวและผลของสนามไฟฟ้าที่รอยต่อค่าความไวที่มีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าแสดงได้โดยสมการที่ (2.25)

$$S_V = \frac{S_A}{V} = \left| \frac{1}{V} \cdot \frac{V_H}{B_Z} \right| = \frac{S_I}{R_{in}}; V_H = S_V \cdot V \cdot B_Z \quad (2.25)$$

โดยที่ หน่วยของ S_V คือ ต่อเทสลา² ($\text{V}^{-1}\text{T}^{-1} = \text{T}^{-1}$) สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีความไม่บริสุทธิ์สูง โดยจะได้สมการที่ (2.26)

$$S_V = \mu_H \cdot \frac{w}{l} \cdot G_H \quad (2.26)$$

โดยที่ μ_H คือสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ของพาหะส่วนมาก w/l เป็นอัตราส่วนความกว้างและความยาวของเพลทสี่เหลี่ยมผืนผ้า และ G_H คือพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับโครงสร้างของแรงดันฮอลล์

ค่าของความไวที่มีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าคือ $S_V = 0.07T^{-1}$ สำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิคอน, $S_V = 0.2 T^{-1}$ สำหรับแกลเลียมอาร์เซไนด์ และ $S_V = 3 T^{-1}$ สำหรับอินเดียมอาร์เซไนด์ ค่าความไวสูงขึ้นตามการลดลงในความยาวของอุปกรณ์

2.2.2 แมกนีโตรีซิสเตอร์ (Magnetoresistor)

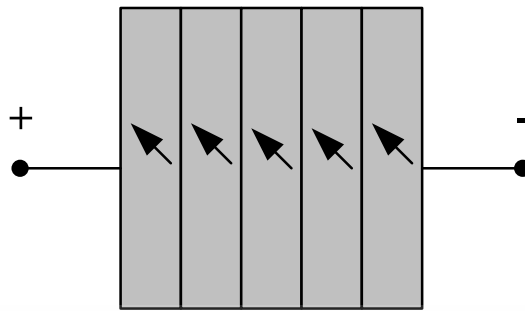
อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างของความต้านทานไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าแมกนีโตรีซิสเตอร์อาศัยปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแทนซ์ (magnetoresistance effect) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลมาจากแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะเกิดเป็นมุม θ ทำให้พาหะเคลื่อนที่ในระนาบที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความต้านทานมากขึ้น มุมการเคลื่อนที่เพียงเบนหาได้โดยสมการที่ (2.27) และค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดจากมุมเพียงเบน θ หาได้ดังสมการที่ (2.28)

$$\theta = \tan^{-1}(\mu \cdot B_z) \quad (2.27)$$

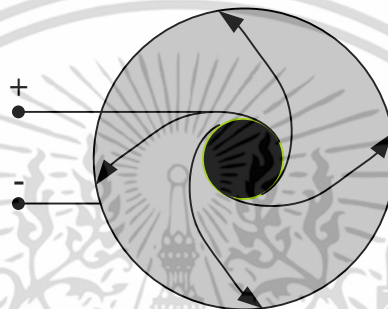
$$R(\theta) = R_0(1 + \tan^2 \theta) \rightarrow R(B_z) = R_0(1 + K_{ar} \cdot \mu^2 \cdot B_z^2) \quad (2.28)$$

โดยที่ K_{ar} ขึ้นกับอัตราส่วนของขนาดเพลทซึ่งในอุดมคติเพลทมีความกว้างมากกว่าความยาว

โดยปกติแล้วแมกนีโตรีซิสเตอร์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ฮอลล์เพลทแบบขนาน (parallel Hall plates) และแบบวงกลม (caibino disc) ดังแสดงรูปที่ 2.7 [3] โดยที่รูปที่ 2.7 (ก) แสดงโครงสร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์ฮอลล์เพลทแบบขนานซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยความต้านทานที่เรียงต่อกันเป็นแผ่นขนาน โดยการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแตกต่างกับอุปกรณ์ฮอลล์คือในอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ไม่อาศัยการเกิดขึ้นของแรงดันฮอลล์แต่อาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้า รูปที่ 2.7 (ข) แสดงโครงสร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์แบบวงกลมซึ่งเป็นโครงสร้างที่แรงดันฮอลล์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยสนามแม่เหล็กสามารถที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเลี้ยวเบนของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นกับสภาพความคล่องตัวของวัสดุอีกด้วยโดยอุปกรณ์ที่สร้างจากซิลิคอนจะมีสภาพความคล่องตัวต่ำ ซึ่งโดยปกติแล้วอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์จะเลือกสารประกอบที่มีค่าสภาพความคล่องตัวสูงในการสร้าง



(ก)



(ข)

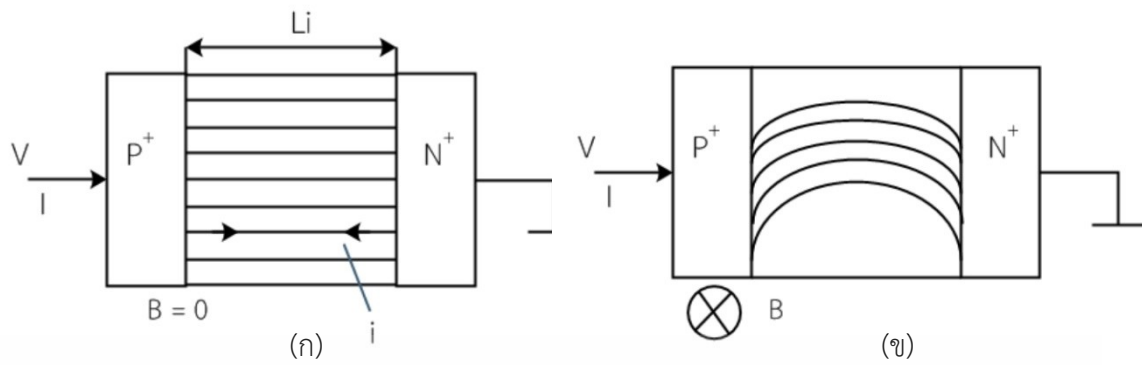
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสเตอร์ (ก) แบบขนาน และ (ข) แบบวงกลม [3]

2.2.3 แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode)

แมกนีโตไดโอดคือฮอลล์เพลท์ที่มีขั้วใช้งานสองขั้วและโครงสร้างคล้ายกับไบโพลาร์ ไดโอด ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติกระแส - แรงดันไฟฟ้า สามารถเรียกปรากฏการณ์นี้ในทางฟิสิกส์คือ Magnetodiode effect ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดย Stafeev ในปี 1958 [1] Magnetodiode effect เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นพร้อมๆกันคือปรากฏการณ์ฮอลล์และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่รอยต่อของไดโอดสามารถแบ่งได้เป็นสองกรณีคือ

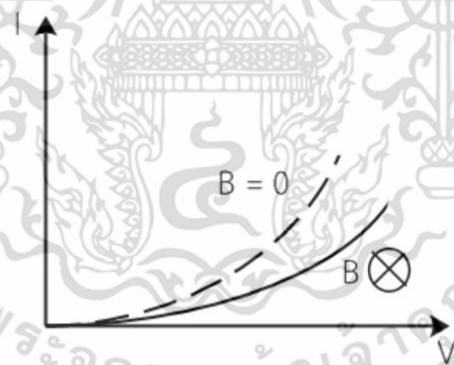
แมกนีโตไดโอดกับปริมาณการรวมตัวใหม่ (Magnetodiode with volume recombination) เป็นกรณีที่เป็นโครงสร้าง pin diode มีความยาวของ quasi intrinsic น้อยกว่าระยะการแพร่ของพาหะ $L_i < L_n$ หรือ $L_i < L_p$ โดยที่ L_i คือความยาวของชั้นอินทรินซิก, L_n คือ ระยะการแพร่ของพาหะอิเล็กตรอน และ L_p คือ ระยะการแพร่ของพาหะโฮล ในขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้า พาหะถูกฉีดไปที่ชั้น intrinsic และมีการรวมตัวใหม่ที่ชั้น intrinsic [1] รูปที่ 2.8 แสดงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในไดโอด ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กทิศทางของกระแสไฟฟ้าเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2.8 (ก) และรูปที่ 2.8 (ข) แสดงการตัดผ่านของสนามแม่เหล็กเป็นผลให้อิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปบริเวณด้านขอบบนของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ทิศทางกระแสไฟฟ้าของแมกนีโตไดโอดกับปริมาณการรวมตัวใหม่ (ก) ไม่มีสนามแม่เหล็ก และ (ข) มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน [1]

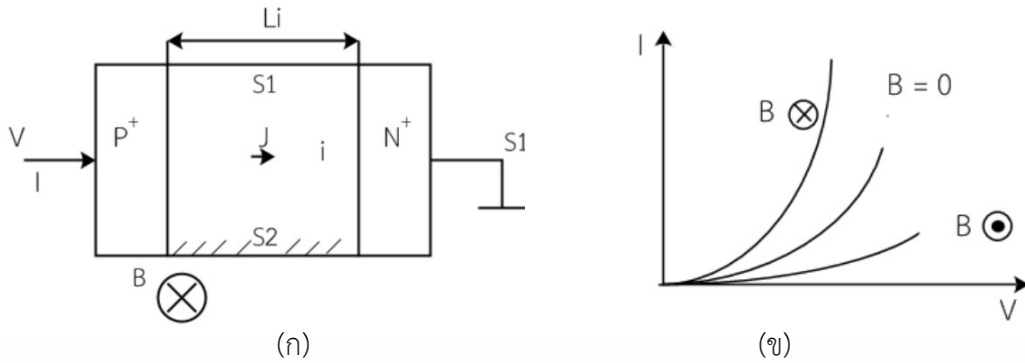
ผลจากสนามแม่เหล็กจะเสมือนเปลี่ยนแปลงจากไดโอดระยะสั้น (Short diode) เป็นไดโอดที่มีระยะรอยต่อยาว (longer diode) สนามแม่เหล็กทำให้กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ลดลง รูปที่ 2.9 แสดงคุณสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของแมกนีโตไดโอดที่มีและไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน กระแสของไดโอดลดลงขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านเนื่องจากระดับการฉีดพาหะที่ลดลงและค่าความต้านทานที่สูงขึ้นที่ชั้นอินทรีนซิก แต่ในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กกลับทิศทางแมกนีโตไดโอดไม่สามารถตรวจวัดได้ [1]



รูปที่ 2.9 คุณสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของแมกนีโตไดโอดกับปริมาณการรวมตัวใหม่ [1]

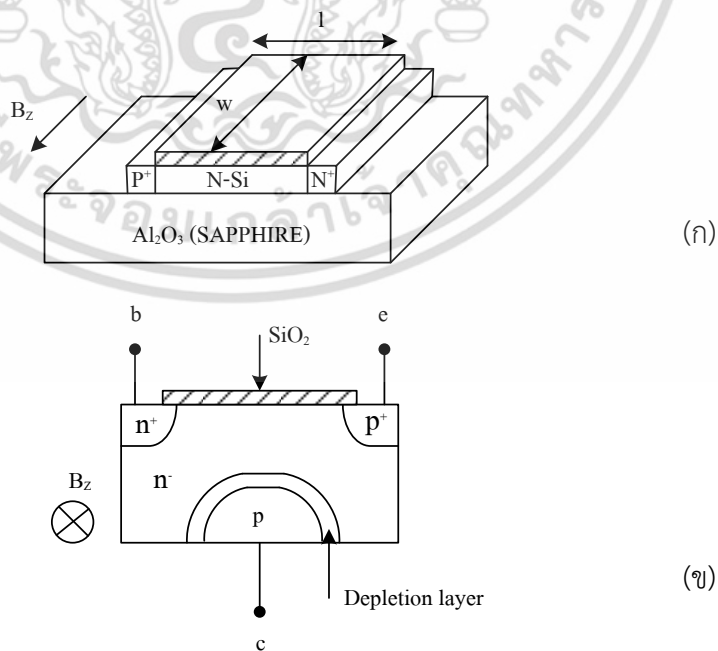
แมกนีโตไดโอดกับการรวมตัวใหม่ที่พื้นผิว (Magnetodiode with surface recombination) อาศัยโครงสร้าง pin diode ที่มีความยาวชั้นอินทรีนซิกน้อยกว่าระยะการแพร่ของพาหะ โดยมีการเพิ่มขั้ว S1 และ S2 เพื่อรองรับความแตกต่างของรวมตัวใหม่ที่พื้นผิวในด้านตรงข้ามตัดขวางของรอยต่อแสดงดังรูปที่ 2.10 (ก) และรูปที่ 2.10 (ข) แสดงคุณสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของแมกนีโตไดโอดถ้าพาหะเคลื่อนที่ไปยังเบนไปรวมตัวใหม่ที่พื้นผิวระดับสูง S2 กระแสไฟฟ้าลดลง แต่ถ้าพาหะเคลื่อนที่ไปยังเบนไปรวมตัวใหม่ที่พื้นผิวระดับต่ำ S1 กระแสไฟฟ้าสูงขึ้นดังนั้นแมกนีโตไดโอดสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางที่ตรงข้ามกัน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 กลไกของแมกนีโตไดโอดกับการรวมตัวใหม่ที่พื้นผิว (ก) โครงสร้างของ pin diode และ(ข) คุณสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า [1]

รูปที่ 2.11 (ก) แสดงโครงสร้าง แมกนีโตไดโอด SOS (Silicon-On-Sapphire) ด้วยเทคโนโลยีวงจรรวม การสร้างรอยต่อ Silicon-Sapphire เป็นการสร้างกลไกการรวมตัวใหม่ระดับสูงแต่ ข้อเสียของ SOS แมกนีโตไดโอด เช่น การสร้าง Si-Al₂O₃ จะเกิดขึ้นได้ยากในบริเวณผิวหน้า, ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กค่าสูงไม่เป็นเชิงเส้นและอุปกรณ์ขึ้นกับอุณหภูมิเป็นสำคัญ [3] พื้นฐานของการใช้โครงสร้างแมกนีโตไดโอดสามารถสร้างได้โดยกระบวนการสร้างพื้นฐานวงจรรวม เช่น CMOS ดังรูปที่ 2.11 (ข) โครงสร้างนี้เหมือนกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่ได้รับไบอัสย้อนกลับที่รอยต่อพี-เอ็น กลายเป็นอัตรการรวมตัวที่ผิวหน้าของ SOS แมกนีโตไดโอด สนามแม่เหล็กแนวตั้งทำให้กระแสเบี่ยงเบนไปจากคอลเลคเตอร์ ดังนั้นกระแสคอลเลคเตอร์เปลี่ยนแปลงเมื่อแรงดันที่รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์เกิดขึ้น [3]

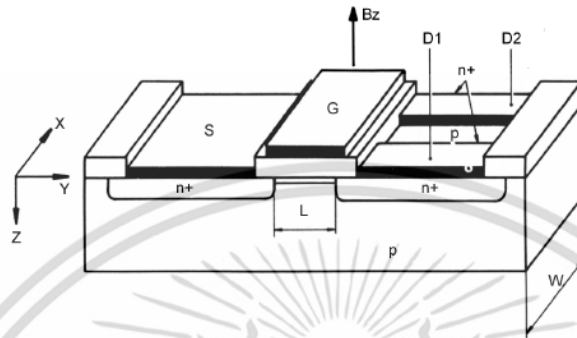


รูปที่ 2.11 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสองชนิด (ก) SOS และ (ข) CMOS [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 มอสเฟตชนิดแยกขั้วเดรน (MAGFET)

โครงสร้างมอสเฟตชนิดแยกขั้วเดรนคืออุปกรณ์มอสเฟตแต่โครงสร้างออกแบบมีขั้วเดรนสองหรือสามขั้วแสดงดังรูปที่ 2.12 กลไกการตรวจจับสนามแม่เหล็กอาศัยการเปลี่ยนแปลงของกระแสเดรนทั้งสองเนื่องจากแรงลอเรนซ์ [1-3] ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กดังสมการที่ (2.29)



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของมอสเฟตชนิดแยกขั้วเดรน [1]

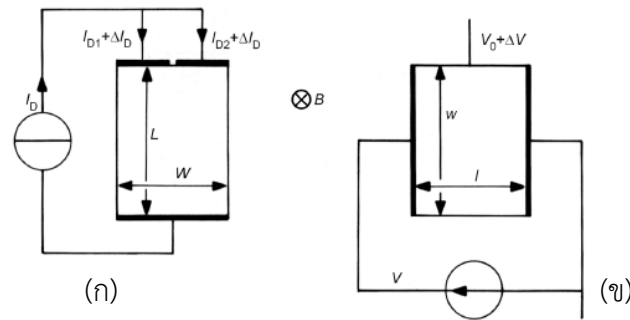
$$S_I = \left| \frac{1}{I_D} \cdot \frac{\Delta I_D}{B} \right| \quad (2.29)$$

โดยที่ I_D คือกระแสเดรนรวมทั้งหมด, $I_D = I_{D1} + I_{D2}$ และ ΔI_D คือการเปลี่ยนแปลงกระแสเดรนเนื่องจากสนามแม่เหล็ก B

รูปที่ 2.13 (ก) แสดงไดอะแกรมโครงสร้างมอสเฟตชนิดแยกขั้วเดรนมีโหมดการทำงานด้วยกระแสไบอัส รูปที่ 2.13 (ข) แสดงอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีโหมดการทำงานด้วยแรงดันไบอัส โครงสร้างมอสเฟตชนิดแยกขั้วเดรนมีสามขั้วคอนแทคเสมือนมีอุปกรณ์สองตัวที่ทำงานร่วมกัน เพราะฉะนั้นสัญญาณเอาต์พุตของอุปกรณ์รูปที่ 2.13 (ข) เท่ากับครึ่งของสัญญาณอุปกรณ์รูปที่ 2.13 (ก) $\Delta I_D = \frac{I_H}{2}$ ได้สมการที่ (2.30)

$$\Delta I_D = \frac{I_H}{2} = \frac{1}{2} \mu_{ch} \frac{w}{l} G_H \cdot I_D \cdot B \perp \quad (2.30)$$

โดยที่ μ_{ch} คือสภาพความคล่องตัวของพาหะในช่องทางเดินกระแส, G คือพารามิเตอร์ทางโครงสร้างของอุปกรณ์



รูปที่ 2.13 (ก) โครงสร้างมอสเฟตชนิดแยกขั้วเดรนในการไบอัสกระแสไฟฟ้า และ (ข) อุปกรณ์ในการทำงานเพื่อเกิดความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ [1]

นำสมการที่ (2.30) แทนในสมการที่ (2.29) ได้สมการค่าความไวของอุปกรณ์แมกเฟตคือ

$$S_I = \frac{1}{2} \mu_{ch} \frac{L}{W} G_H \quad (2.31)$$

ดังนั้นค่าความไวสูงสุดของอุปกรณ์แมกเฟตตั้งสมการที่ (2.32)

$$S_{I(max)} \approx 0.37 \mu_{ch} \left(\frac{L}{W} \rightarrow \infty \right) \quad (2.32)$$

2.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor)

แมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยโครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ และกลไกการทำงาน ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเลคเตอร์ งานวิจัยช่วงแรกๆที่อธิบายกลไกการทำงานแมกนีโตทรานซิสเตอร์ถูกรายงานโดย Suhl และ Shockley ในปี 1949 จนกระทั่งในปี 1950 Brown ได้ทำการสร้างผลอัตรายายกระแสของทรานซิสเตอร์ด้วยความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก Melngailis และ Rediker ทำการวิจัยเพื่อจุดประสงค์การใช้ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก [1] ตั้งแต่นั้นมาทุกๆงานที่ตีพิมพ์ในโครงสร้างที่มีความหลากหลายของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก (MagBJTs) ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามารถหาได้โดยสมการที่ (2.33)

$$S_I = \left| \frac{1}{I_C} \cdot \frac{\Delta I_C}{B_z} \right| \quad (2.33)$$

โดยที่ I_C คือกระแสคอลเลคเตอร์ และ ΔI_C คือการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเลคเตอร์ขณะที่มี

สนามแม่เหล็กตัดผ่าน B_z
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta I_C = I_C(B) - I_C(0) \quad (2.34)$$

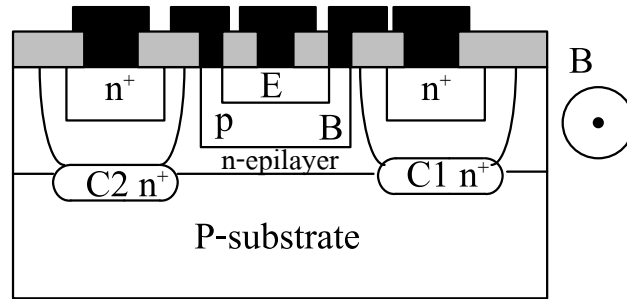
ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ถูกพัฒนามาจนถึงปัจจุบันที่สามารถครอบคลุมอยู่ในย่าน 10^{-2} ถึงมากกว่า 10 T^{-1} ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กถูกขยายออกตามกลไกการทำงานที่มีโครงสร้างหลากหลายของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ขึ้นกับผลของความแตกต่าง โดยแท้จริงแล้วปรากฏการณ์ฮอลล์มีบทบาทแทรกกับผลการทำงานของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และทำให้เกิดผลของความแตกต่าง กลไกการทำงานที่ทำให้เกิดผลของความแตกต่างมี 3 กลไกด้วยกันคือ

1. ผลการเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้า (The current deflection effect) นี้คือหลักการสำคัญทำให้เกิดผลที่เหมือนกับอุปกรณ์ที่มีค่าความยาวคอนแทคที่ยาว
2. ผลของกระแสการฉีดพาหะ (The injection modulation) แรงดันฮอลล์ถูกทำให้เกิดขึ้นในย่านเบสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ทำการมอดดูเลทด้วยแรงดันระหว่างขั้วอิมิตเตอร์และเบส ดังนั้นกลไกคล้ายกับ carrier injection
3. ผลของความแตกต่างเนื่องจากรอยต่อ (The magnetodiode effect) กลไกเกิดขึ้นที่ไดโอดที่มีรอยต่ออิมิตเตอร์และเบสของทรานซิสเตอร์เป็นส่วนหนึ่งของแมกนีโตไดโอด ปรากฏการณ์นี้นำไปสู่ค่าความไวของกระแสคอลเลคเตอร์

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (vertical magnetotransistor) และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน- (lateral magnetotransistor) ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง กลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง (ΔI_C) ขึ้นอยู่กับการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) [1-8]

2.3.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง

รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ตามแนวตั้ง (Vertical magnetotransistor) โดยสร้างจากกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ โครงสร้างประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด npn สองตัวต่อกันด้วยอิมิตเตอร์ร่วมและเบสร่วม มีชั้นฝัง (buried layer) อยู่ใต้ส่วนเบส คอลเลคเตอร์ทั้งสองสร้างจากอะตอมสารเจือชนิด n^+ เพื่อไม่ให้ข้อต่อเซอร์กิตจึงกำหนดให้มีช่องว่างระหว่าง ชั้นฝัง (buried layer) ทั้งสอง [1-3]



รูปที่ 2.14 ภาคตัดขวางโครงสร้างของแมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง [1]

พาหะส่วนมากถูกฉีดจากอิมิตเตอร์ผ่านส่วนเบสไปยังชั้นอีพิกของคอลเลคเตอร์ กระแสจะแยกเป็นสองส่วนโดยแต่ละส่วนจะไปถึงชั้นฝัง (Buried layer) ทั้งสอง ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากันอยู่ในสภาวะสมดุล $I_{C1} = I_{C2} = I_{CO} / 2$ โดยที่ I_{CO} คือผลรวมกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสคอลเลคเตอร์ แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในเบสทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองไม่สมดุลเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง $\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2}$ ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองหาได้โดยสมการที่ (2.35)

$$\Delta I_C = G \cdot \mu_n (L / W_E) \cdot I_{CO} \cdot B \quad (2.35)$$

โดยที่ L คือระยะระหว่างอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์, W_E คือ ความกว้างอิมิตเตอร์ และ G คือค่าคงที่ที่ขึ้นกับโครงสร้างของอุปกรณ์ ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กหาได้โดย

$$S = \left| \Delta I_C / I_{CO} B \right| \quad (2.36)$$

แทนสมการที่ (2.36) ลงในสมการที่ (2.37) จะได้

$$S = G \cdot \mu_n^* (L / W_E) \quad (2.37)$$

ในสภาวะปกติขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านสามารถหาความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ตั้งสมการที่ (2.38) และ (2.39)

$$S_A = \left| \partial V_C / \partial B \right|_{B=0} = R_C^{-1} \left| \partial I_C / \partial B \right|_{B=0} \quad (2.38)$$

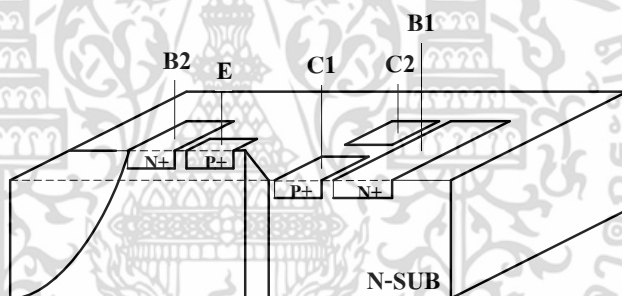
$$S = V_C^{-1} \left| \partial V_C / \partial B \right|_{B=0} = I_C^{-1} \left| \partial I_C / \partial B \right|_{B=0} \quad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

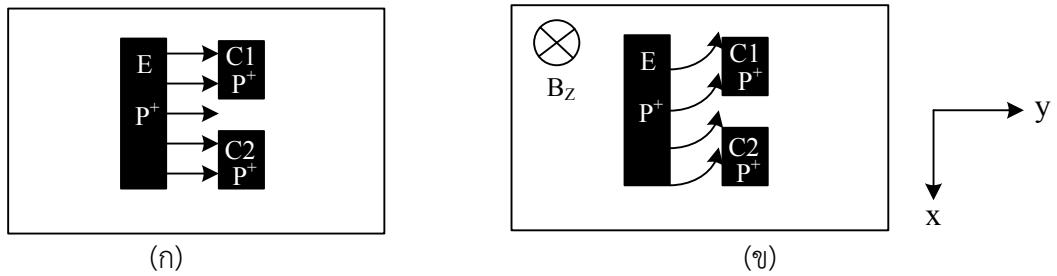
2.3.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน

โครงสร้างโดยทั่วไปของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน (Lateral magnetotransistor) แสดงดังรูปที่ 2.15 โดยการทำงานพาหะจะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปถึงคอลเลคเตอร์ที่แยกกันอยู่สองข้างอย่างสมมาตรโดยสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง (ΔI_C) กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ pnp ชนิดกระแสไหลตามแนวนอนประกอบด้วย อิมิตเตอร์ E, สองคอลเลคเตอร์ C1, C2 และสองขั้วเบสคอนแทค B1, B2 [1-8]



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน [3]

แมกนีโตทรานซิสเตอร์เมื่ออิมิตเตอร์และเบสไบอัสไปข้างหน้าพาหะส่วนมาก (majority carriers) จากอิมิตเตอร์ถูกฉีดเข้าไปในเบสข้ามเบสไปยังคอลเลคเตอร์ สนามไฟฟ้าในเบสช่วยพาหะในการเคลื่อนที่จากเบสไปยังคอลเลคเตอร์ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้นเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านความหนาแน่นของพาหะที่คอลเลคเตอร์ทั้งสองมีปริมาณเท่ากัน กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากัน ($\Delta I_C = 0$) นั่นคืออยู่ในภาวะสมดุลแสดงดังรูปที่ 2.16 (ก) แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ซึ่งกระทำกับประจุพาหะ ทำให้พาหะส่วนน้อยในเบสเบี่ยงเบนความหนาแน่นของประจุพาหะที่คอลเลคเตอร์ทั้งสองไม่เท่ากัน เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ($\Delta I_C \neq 0$) นั่นคือการเปลี่ยนแปลงจากภาวะสมดุลเป็นไม่สมดุลแสดงดังรูปที่ 2.16 (ข)



รูปที่ 2.16 ผลของแรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะ (โอล) (ก) $B_z = 0$ และ (ข) $B_z > 0$

ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ I_{C1} และ I_{C2} ได้ดังสมการที่ 2.39 เพราะฉะนั้นผลรวมของ I_{C1} และ I_{C2} คือกระแสคอลเลคเตอร์ที่ไหลในภาวะปกติในตัวเอง ดังสมการที่ (2.41) ส่วนสมการที่ (2.42) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ΔI_C กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ซึ่ง ΔI_C แปรผันตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสเอมิเตอร์ ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบสัมผัสและแบบสมบูรณ์แสดงได้ดังสมการที่ (2.43) - (2.44)

$$\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2} \tag{2.40}$$

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} \tag{2.41}$$

$$\Delta I_C = K_g (\mu_p + \mu_n) \cdot B_z \cdot I_E \tag{2.42}$$

ซึ่ง μ_p และ μ_n คือค่าความคล่องตัว (mobility) ของอิเล็กตรอนและโฮล

K_g เป็นค่าคงที่ที่มีความสัมพันธ์กับรูปร่างลักษณะของตัวอุปกรณ์

$$S_R = \frac{\Delta I_C}{I_O \cdot \Delta B_z} \tag{2.43}$$

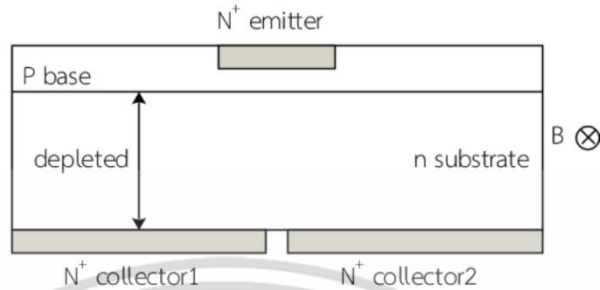
$$S_A = \frac{\Delta V}{\Delta B_z} \tag{2.44}$$

ซึ่ง I_O คือแหล่งจ่ายกระแสคงที่และ ΔB_z คือการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก

2.3.3 กลไกการเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้า

ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นวิธีการสำหรับปรากฏการณ์ฮอลล์ การเปลี่ยนแปลงนี้กลไกการเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้า (Current Deflection Mechanism) ปรากฏขึ้นตามการเกิดขึ้นของสนามไฟฟ้าฮอลล์ รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ของ Flynn เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นโครงสร้างแบบแยกคอลเลคเตอร์ (split-collector magnetotransistor) สนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับรูปด้านตัดขวางเป็นผลให้กระแสที่ถูกฉีดจากอิมิตเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง [1-3]



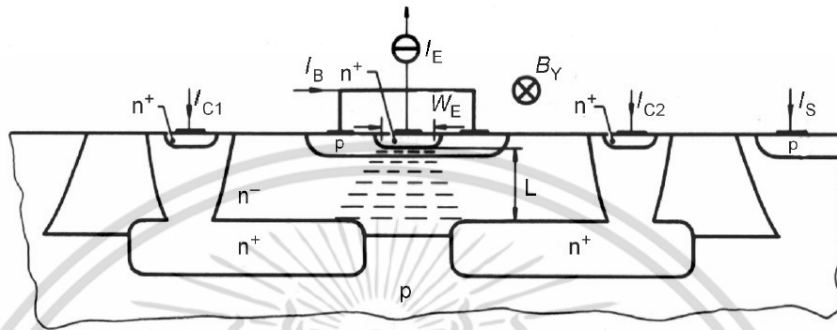
รูปที่ 2.17 โครงสร้างภาคตัดขวางของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบแยกคอลเลคเตอร์ [1]

รูปที่ 2.18 เป็นโครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบแยกคอลเลคเตอร์ชนิดเอ็น-พี-เอ็น บนพื้นฐานเทคโนโลยีวงจรรวมไปโพลาร์ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก B_y เป็นผลให้เกิดการเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าและเกิดความไม่เท่ากันระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง I_{c1} และ I_{c2} โดยส่วนใหญ่ของพื้นที่คอลเลคเตอร์ถูกเจือสารอ่อนและบริเวณปลอดพาหะขึ้นกับการไปอัสยอนกลับของรอยต่อคอลเลคเตอร์-เบส อิเล็กตรอนถูกฉีดจากอิมิตเตอร์ผ่านเบสไปยังขั้วคอลเลคเตอร์ ถ้ามีสนามแม่เหล็กในทิศทางตัดขวางอิเล็กตรอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์นี้ทำให้นึกถึงอุปกรณ์มอสทรานซิสเตอร์แบบแยกขั้วเดรน (split-drain MOSFET Hall effect device) บริเวณปลอดพาหะระหว่างเบสและคอลเลคเตอร์ทั้งสองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในรูปที่ 2.20 เป็นส่วนที่คล้ายกับช่องทางเดินกระแสของอุปกรณ์มอสทรานซิสเตอร์แบบแยกขั้วเดรน บทบาทของอิมิตเตอร์และเบสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์มีสิ่งเดียวคือฉีดพาหะไปยังชั้นบริเวณปลอดพาหะ โดยทั้งสองขั้วนี้ไม่ได้เป็นส่วนหลักในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ขั้วอิมิตเตอร์และเบสถูกเจือสารด้วยความเข้มข้นสูง อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์แบบแยกคอลเลคเตอร์ซึ่งมีความสอดคล้องกับเทคโนโลยีวงจรรวมไปโพลาร์แสดงในรูปที่ 2.18 ส่วนที่เป็นชั้นอีพิเลเยอร์ที่การโด๊ปเจือสารอ่อน (n^-) เป็นย่านคอลเลคเตอร์ และมีการแยกขั้วคอลเลคเตอร์โดยการแยกชั้น buried layer การทำงานเหมือนกับโครงสร้างของ Flynn ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถหาได้ตามโครงสร้างที่เหมือนกับ MOS Hall device ตามสมการที่ (2.45)

$$S_I = \frac{1}{2} \mu_{hm} \cdot \frac{L}{W_E} \quad (2.45)$$

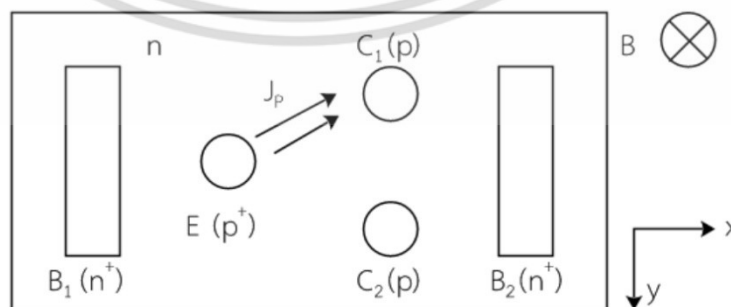
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ S_f คือค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า, $G_{Hn} = 1$, μ_{Hn} คือ สภาพความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ระยะทางระหว่างอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์, L คือ ระยะระหว่างอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ และ W_E คือ ความกว้างอิมิตเตอร์ ค่าความไวอยู่ในช่วง $0.03-0.05 T^{-1}$ โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตามรูปที่ 2.18 สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในสองทิศทางและสามทิศทาง



รูปที่ 2.18 โครงสร้างภาคตัดขวางของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบแยกขั้วคอลเลคเตอร์บนพื้นฐานเทคโนโลยีวงจรรวมไบโพลาร์ [1]

รูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีกลไกการทำงานของ current deflection [1] เป็นโครงสร้างการเคลื่อนที่พาหะแวนอนชนิดทรานซิสเตอร์พีเอ็นพีแบบมีคอลเลคเตอร์สองขั้ว อิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ทั้งสองถูกสร้างในพื้นที่เบสที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น พื้นที่เบสจะเป็นส่วนหนึ่งของชั้นอีพิตาเซียลชนิดเอ็นดังนั้นโครงสร้างนี้มีความสอดคล้องกับเทคโนโลยีวงจรรวมไบโพลาร์ ขั้วเบส B1 และ B2 ถูกใช้ด้วยการไบอัสแรงดันไฟฟ้าเพื่อต้องการสร้างสนามไฟฟ้าแวนอนในพื้นที่เบส เป็นที่แน่ชัดว่าพื้นที่เบสทำให้เป็นชั้นฮอลล์แต่ไม่มีขั้วเซนเซอร์คอนแทค ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก B เป็นผลให้การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า E ซึ่งพิจารณาในทิศทาง x และการเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้า J ซึ่งพิจารณาทิศทางเดียวกับ E



รูปที่ 2.19 ภาพด้านบนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบแยกขั้วคอลเลคเตอร์ [1]

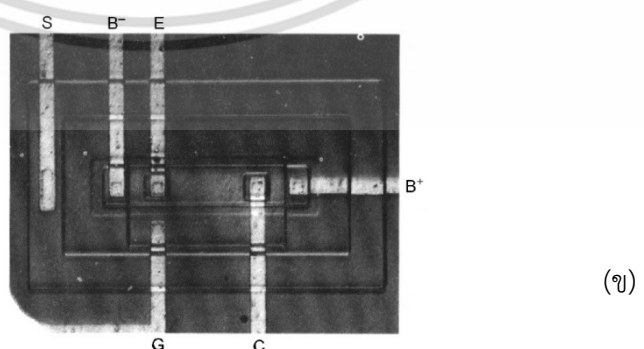
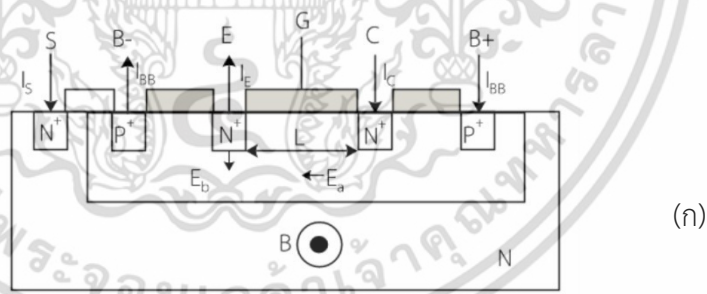
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างในรูปที่ 2.19 มีความคล้ายกับการวัดผลสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ของพาหะส่วนน้อย มากกว่านั้นการทำงานของอุปกรณ์สองตัวเป็นเช่นเดียวกัน อิมิตเตอร์ฉีดพาหะโฮลไปยังพื้นที่เบสภายใต้การเร่งของสนามไฟฟ้าในเบสซึ่งโฮลเป็นพาหะส่วนน้อย สนามแม่เหล็กตัดผ่านอุปกรณ์สนามไฟฟ้าในเบสเปลี่ยนแปลงสำหรับมุมฮอลล์ของพาหะส่วนใหญ่ Θ_{Hn} กระแสโฮลพิจารณาที่สนามไฟฟ้าสำหรับมุมฮอลล์ Θ_{Hn} ดังนั้นมุมทั้งหมดของการเบี่ยงเบนของพาหะส่วนน้อยในเบสสามารถหาได้โดย

$$\Theta_{tot} = -\mu_{Hn}B + \mu_{Hp}B \tag{2.46}$$

โดยสมมุติฐานเป็นค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กขนาดอ่อนเพราะฉะนั้นจะได้ $\mu_{Hn} \leq 0$ และ $\mu_{Hp} \geq 0$ การเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าเป็นผลให้เกิดความไม่เท่ากันของกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง

โครงสร้างในรูปที่ 2.20 แสดงแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีความสอดคล้องกับเทคโนโลยีวงจรรวมซีมอส [1] โครงสร้างของอุปกรณ์มีช่องทางเดินกระแสแต่การทำงานเป็นอุปกรณ์ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กับการเคลื่อนที่ -ดริฟท์ของพาหะในพื้นที่เบส อุปกรณ์อยู่ในบ่อชนิดพีเป็นพื้นที่เบสของทรานซิสเตอร์ สองขั้วเบสคอนแทค B^+ โดยความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก B ตั้งฉากกับรูปภาพภาคตัดขวางซึ่งกระแสอิมิตเตอร์ I_E กระจายไประหว่าง I_C และ I_S การปรับเปลี่ยนของ I_C ถูกใช้เป็นสัญญาณตรวจจับสนามแม่เหล็ก



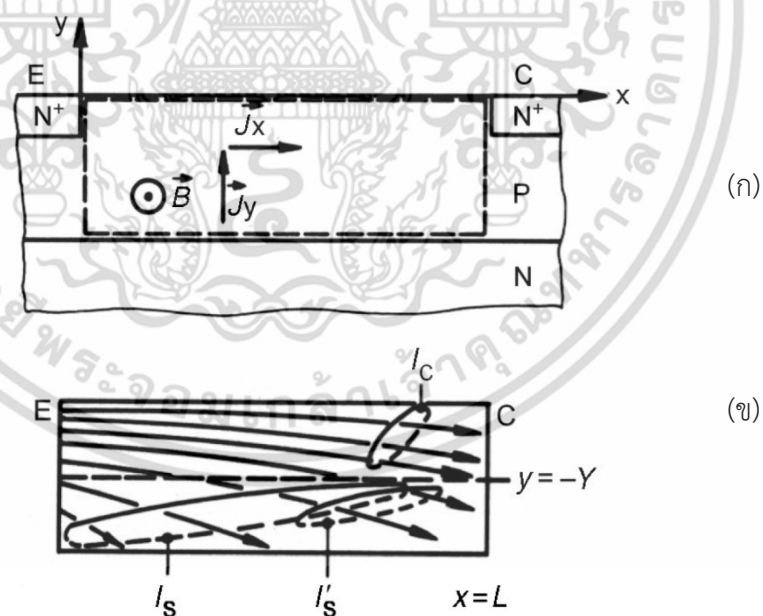
รูปที่ 2.20 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดแวนอนในเทคโนโลยีซีมอส (ก) ภาคตัดขวาง (ข) รูปภาพ

ด้านบน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้ว B^- ซึ่งขั้วทั้งสองมีการให้ไบอัสแรงดันไฟฟ้าสำหรับการฉีดพาหะส่วนน้อยในการเคลื่อนที่ในพื้นที่เบส ขั้ว N^+ ทั้งสองถูกแยกออกจากกันโดยความยาวของพื้นที่เบส L ซึ่งมีขั้วอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ ขั้วฐานรอง S ทำงานเป็นขั้วคอลเลคเตอร์ที่สอง พิจารณาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของอุปกรณ์โดยสมมติฐานคือการไบอัสอย่างเหมาะสมการการไบอัสไปข้างหน้าซึ่งรอยต่ออิมิตเตอร์ -เบส ถูกไบอัสไปข้างหน้า รอยต่อคอลเลคเตอร์และเบสทั้งสองถูกไบอัสย้อนกลับ และขั้วคอนแทกเบส B^+ มีศักย์ที่สูงกว่าขั้วคอนแทก B^- เนื่องจากการเร่งด้วยสนามไฟฟ้า E_a ในพื้นที่เบส อิเล็กตรอนถูกฉีดในพื้นที่เบสโดยขั้วอิมิตเตอร์ในบริเวณด้านขวา พาหะเคลื่อนที่ตลอดในความยาวของเบสและสะสมด้วยขั้วคอลเลคเตอร์ออกมาเป็นกระแสคอลเลคเตอร์ I_C อย่างไรก็ตามการแพร่ด้านล่างถูกสะสมด้วยขั้วคอลเลคเตอร์ S ออกมาเป็นกระแสฐานรอง I_S การเร่งสนามไฟฟ้าเป็นการช่วยอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างการใช้กระแส I_C และกระแสพารามิเตอร์แฝง I_S

ในกรณีมีสนามแม่เหล็ก B ตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของรูปที่ 2.21 (ก) เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน I_C/I_S กลไกที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์เป็นผลจากการเบี่ยงเบนของอิเล็กตรอน เมื่อสนามแม่เหล็กตัดผ่านอุปกรณ์อิเล็กตรอนเกิดการเบี่ยงเบนไปยังรอยต่อฐานรองและดังนั้นอิเล็กตรอนที่เป็นกระแสคอลเลคเตอร์น้อยลง รูปที่ 2.21 (ข) เส้นความเข้มของกระแสไฟฟ้าอยู่ในระยะ $y \geq -Y$ เป็นกระแสคอลเลคเตอร์ I_C เส้นอื่นๆ เป็นกระแสฐานรอง I_S ขึ้นกับค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก B กระแสฐานรอง I'_C เพิ่มเติมไปสู่ I_C และ I_S



รูปที่ 2.21 (ก) พื้นที่เบสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ด้านตัดขวางและ (ข) เส้นความเข้มของกระแสไฟฟ้า [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทิศทางของสนามแม่เหล็กกลับทิศทางอิเล็กทรอนิกส์อนเบี่ยงเบนในทิศทางตรงกันข้าม มีทิศทางไปยังผิวหน้าของอุปกรณ์เป็นผลให้กระแสคอลเลคเตอร์สูงขึ้น เหตุการณ์นี้เกิดขึ้นเพียงอย่างเดียวถ้าไม่ประเมิผลของการรวมตัวใหม่ที่รอยต่อซิลิคอน-ออกไซด์ โครงสร้างมอสที่อยู่ด้านบนของพื้นที่เบสในการรับรองเงื่อนไข การประยุกต์ใช้งานแรงดันลบที่เกตด้านบนของบริเวณผิวของพื้นที่เบสและผลักดันพาหะส่วนน้อยจากรอยต่อ ปรากฏการณ์นี้เป็นประโยชน์อย่างมากกับทรานซิสเตอร์ชนิดมอสในการทำงานในโหมดไปโพลาร์ การวิเคราะห์ผลทำได้โดยอาศัยสมการค่าความไวที่ (2.44) ของซีมอสแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ถ้าถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า E_a ในพื้นที่เบสมีขนาดเล็ก ดังนั้นอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยการแพร่เป็นหลักซึ่งค่าความไวหาได้โดยสมการที่ (2.47)

$$S_I = |\mu_{Hn}| \cdot \frac{L}{Y} \quad (2.47)$$

ในทางตรงข้ามกรณีที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าค่าสูง

$$S_I = |\mu_{Hn} - \mu_{Hp}| \cdot \frac{L}{Y} \quad (2.48)$$

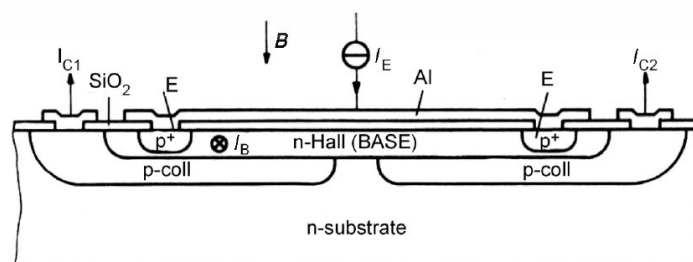
โดยที่ μ_{Hp} และ μ_{Hn} คือสภาพความคล่องตัวฮอลล์ของอิเล็กตรอนและโฮลในบ่อชนิดพี L คือระยะระหว่างอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ และ Y คือพารามิเตอร์ทางโครงสร้างสามารถประมาณได้โดย

$$y_{jn} \langle Y \langle y_{jp} \quad (2.49)$$

โดยที่ y_{jn} และ y_{jp} แสดงถึงความลึกรอยต่อของพื้นที่คอลเลคเตอร์และบ่อชนิดพี ตามลำดับ

2.3.4 กลไกผลของกระแสการฉีดพาหะ

กลไกผลของกระแสการฉีดพาหะ (The Injection Modulation) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ แสดงได้โดยโครงสร้างดังรูปที่ 2.22 เป็นโครงสร้างการร่วมกันของอุปกรณ์ฮอลล์แวนอนและไปโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิดแนวตั้งทั้งสองตัว [1] ขั้วอิมิตเตอร์สองขั้วชนิด P^+ แพร่เข้าไปในอุปกรณ์-



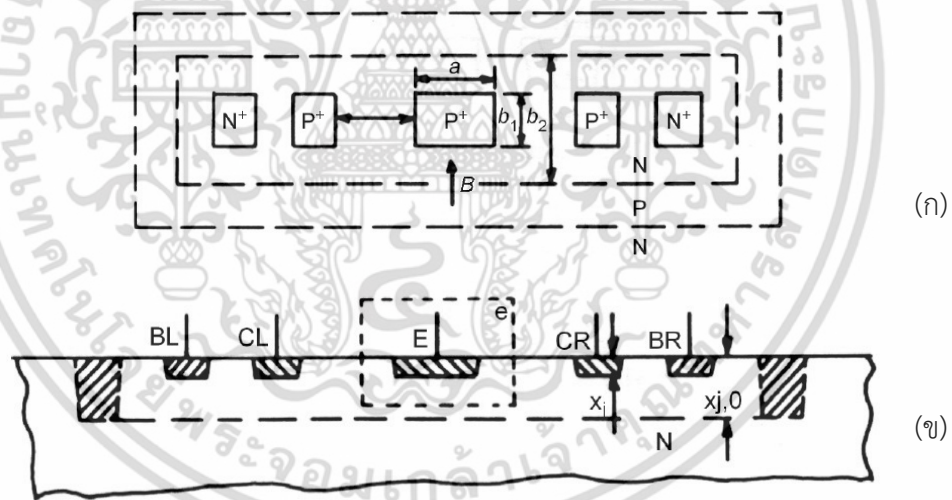
รูปที่ 2.22 โครงสร้างที่ต่อร่วมกันของอุปกรณ์ฮอลล์และไปโพลาร์ทรานซิสเตอร์สองตัว [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮอลล์แทนที่ขั้วเซนเซอร์คอนแทค ขั้วคอลเลคเตอร์ชนิดเอ็นสองขั้วถูกแยกออกจากกันและอยู่ในตำแหน่งโอบล้อมอุปกรณ์ฮอลล์ซึ่งทั้งหมดสร้างบนฐานรองชนิดเอ็น อุปกรณ์ฮอลล์ถูกรองรับเป็นขั้วเบสของทรานซิสเตอร์แนวตั้งชนิดพีเอ็นพีทั้งสอง ในกระบวนการทำงานอุปกรณ์ฮอลล์ถูกไบอัสกระแสไฟฟ้า I_B เคลื่อนที่ตามแนวทิศทางของพื้นที่เบสซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับด้านตัดขวางตามรูปที่ 2.23 ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก B ทิศทางตั้งฉากกับผิวหน้าของอุปกรณ์แรงดันฮอลล์เกิดขึ้นตกคร่อมพื้นที่เบส ถ้าอิมิตเตอร์ทั้งสองมีศักย์ไฟฟ้าที่เท่ากัน แรงดันฮอลล์ถูกทำให้เกิดในพื้นที่เบสทำหน้าที่เป็นความแตกต่างระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ทั้งสอง ถ้าทรานซิสเตอร์ทั้งสองถูกไบอัสสำหรับการทำงานไบอัสไปข้างหน้า ความแตกต่างแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิมิตเตอร์และเบสจะกลับไปเป็นความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง [1]

กลไกกระแสการฉีดพาหะโดยผลของสนามแม่เหล็กในทรานซิสเตอร์เกิดขึ้นจากสองเงื่อนไขคือ

1. พื้นที่เบสเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมและถูกไบอัสเพื่อเป็นการทำงานเป็นอุปกรณ์ฮอลล์ในการเกิดแรงดันฮอลล์ (กล่าวถึงเฉพาะพื้นที่เบสตั้งแต่พื้นที่อิมิตเตอร์ที่ถูกโอบล้อมด้วยความเข้มข้นสูงและแรงดันฮอลล์เกิดขึ้นในพื้นที่เล็กน้อย)
2. ทรานซิสเตอร์เป็นโครงสร้างที่เหมาะสมและถูกไบอัสเพื่อช่วยให้เกิดแรงดันฮอลล์ไปถึงการปรับแรงดันไบอัสอิมิตเตอร์-เบส และกระแสคอลเลคเตอร์

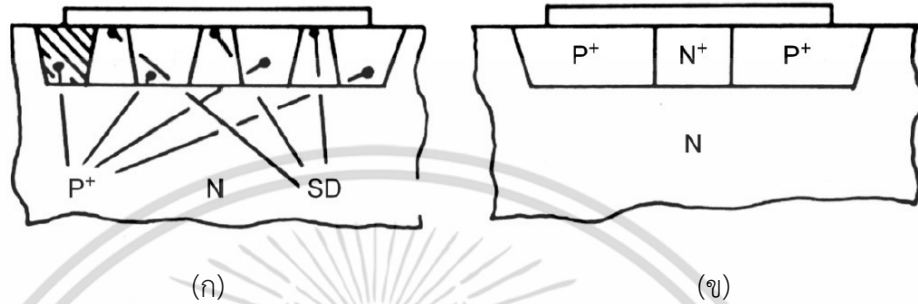


รูปที่ 2.23 แมกนีโตทรานซิสเตอร์แนวอนชนิด พีเอ็นพี แบบแยกขั้วคอลเลคเตอร์ (ก) ด้านบน และ (ข) ภาคตัดขวาง [1]

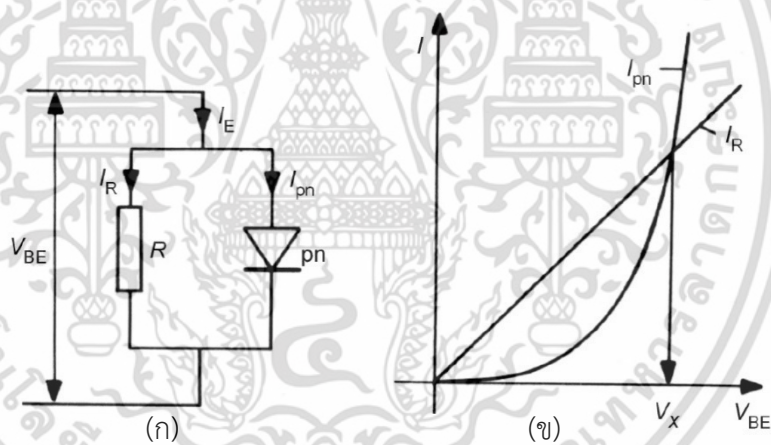
โครงสร้างของอุปกรณ์ในรูปที่ 2.23 (ข) เป็นโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แนวอนชนิดพีเอ็นพีแบบแยกขั้วคอลเลคเตอร์ ขั้วทั้งห้าถูกโอบล้อมด้วยความเข้มข้นสารเจือที่สูง (อิมิตเตอร์, คอลเลคเตอร์สองขั้ว CL, CR, และเบสคอนแทคสองขั้ว BL, BR) เรียงกันอย่างสมมาตรบนผิวหน้าของซิลิคอนฐานรองชนิดเอ็น การจำกัดกระแสไปยังระนาบที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและทำให้มีการเพิ่มขึ้นของค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งพื้นที่อุปกรณ์ถูกล้อมรอบโดยพื้นที่ชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะสำคัญของแมกนีโตทรานซิสเตอร์นี้คือการลัดวงจรอิมิตเตอร์ ในกรณีที่ 1. รอยต่ออิมิตเตอร์-เบส ($p^+ - n$) ถูกต่อในทิศทางขนานกับไดโอดแบบซีดกี (SD) และกรณีที่ 2. รอยต่อแบบโอห์มมิก ประสิทธิภาพของการลัดวงจรอิมิตเตอร์ขึ้นอยู่กับความมั่งคั่งของแรงดันไบอัสอิมิตเตอร์-เบส



รูปที่ 2.24 ประสิทธิภาพการฉีดระดับต่ำ (ก) รอยต่อ $p^+ - n$ ถูกต่อในแนวขนานกับไดโอดซีดกี (ข) การลัดวงจรรอยต่อ $p^+ - n$ เป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก (โลหะ- n^+) [1]



รูปที่ 2.25 (ก) วงจรเสมือนของการลัดวงจรอิมิตเตอร์และ (ข) คุณสมบัติความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้า [1]

รูปที่ 2.25 (ก) ตามรูปที่ 2.24 รอยต่อ $p - n$ แสดงเป็นรอยต่อ $p^+ - n$ และ R คือ ค่าความต้านทานที่กระจายในพื้นที่เบสในขอบเขตของรอยต่อโอห์มมิก ทั้งสองส่วน ($p - n$, R) ถูกไบอัสด้วยแรงดันอิมิตเตอร์-เบส V_{BE} กระแสอิมิตเตอร์ I_E ถูกแบ่งกลายเป็นกระแสการฉีด I_{pn} และกระแส I_R รูปที่ 2.25 (ข) คุณสมบัติความสัมพันธ์กระแส -แรงดันไฟฟ้าของวงจรรูปโดย $V_{BE} = V_x$, $I_{pn} = I_R$ ประสิทธิภาพอิมิตเตอร์ของรอยต่ออิมิตเตอร์-เบส $p^+ - n$ สามารถหาได้โดย

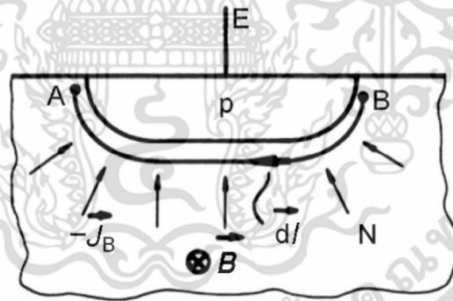
$$\gamma = \frac{I_P}{I_E} \tag{2.50}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ I_p คือ กระแสโพลที่ฉีดจากอิมิตเตอร์ไปที่เบส และ I_E คือ กระแสอิมิตเตอร์ทั้งหมด $\gamma \geq 0.99$ มากกว่าย่านที่กว้างของกระแสอิมิตเตอร์

พิจารณาประสิทธิภาพของอิมิตเตอร์ของการลัดวงจรแสดงในรูปที่ 2.25 (ข) เห็นได้ว่ากระแสอิมิตเตอร์ขนาดเล็กเป็นผลให้ประสิทธิภาพอิมิตเตอร์ต่ำมาก $\gamma \rightarrow 0$ ($V_{EB} \ll V_x$, $I_{pn} \ll I_R = I_E$) กระแสอิมิตเตอร์มีค่าสูง ประสิทธิภาพอิมิตเตอร์มีแนวโน้มไปที่ค่ารอยต่อที่ไม่มีการลัดวงจร $\gamma \rightarrow \gamma_{pn}$ ($V_{EB} \ll V_x$, $I_{pn} \ll I_R = I_E$) ในกรณีนี้ $V_{EB} = V_x$ ประสิทธิภาพอิมิตเตอร์เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงในกระแสอิมิตเตอร์

การทำงานของแมกนีโททรานซิสเตอร์ด้วยสมมติฐานทรานซิสเตอร์ถูกไบอัสไปข้างหน้าสำหรับการทำงานช่วงแอคทีฟ ขั้วเบสคอนแทกมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองมีค่าเท่ากัน ถ้ามีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตามรูปที่ 2.23 ทำให้เกิดความไม่สมดุลกันระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ด้านซ้ายและด้านขวา ภายใต้เงื่อนไขการไบอัสที่เหมาะสม ความไม่สมดุลนี้คือผลของกระแสการฉีดพาหะ พิจารณาแรงดันฮอลล์ที่เกิดขึ้นในพื้นที่เบสระหว่างจุด A และ B ที่อยู่ด้านข้าง (ตรงข้ามขั้วคอลเลคเตอร์) ของอิมิตเตอร์ดังรูปที่ 2.26 ซึ่งไม่คิดถึงผลของการลัดวงจร แรงดันฮอลล์เท่ากับเส้นผลรวมของสนามไฟฟ้าฮอลล์เหนือกว่าบางเส้น AB แสดงได้ตั้งสมการที่ (2.51)



รูปที่ 2.26 การเกิดขึ้นของแรงดันฮอลล์บริเวณรอยต่ออิมิตเตอร์-เบส [1]

การเกิดขึ้นของแรงดันฮอลล์บริเวณรอยต่ออิมิตเตอร์ -เบส ถูกสรุ J แสดงความเข้มข้นพาหะส่วนมาก และเส้น AB คือส่วนของการรวมผลกัน สามารถแสดงสมการแรงดันฮอลล์ตั้งสมการ (2.51)

$$V_H = \int_A^B E_H \cdot dl \quad (2.51)$$

โดยที่ dl คือ line element

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_H = -R_H |J \times B| \quad (2.52)$$

โดยที่ E_H คือสนามไฟฟ้าฮอลล์, R_H คือสัมประสิทธิ์ฮอลล์, J คือความหนาแน่นกระแสรวม และ B คือสนามแม่เหล็ก ภายใต้การสันนิษฐานรอยต่ออิมิตเตอร์ -เบสเป็นลักษณะที่สั้น การเคลื่อนที่กระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่ในทิศทางตั้งฉากกับ B และ dl แสดงได้โดย

$$V_H = -R_H \cdot B \frac{1}{t} \int_A^B J_t \cdot dl \quad (2.53)$$

$$|V_H| = \frac{|R_H|}{t} I_E B \quad (2.54)$$

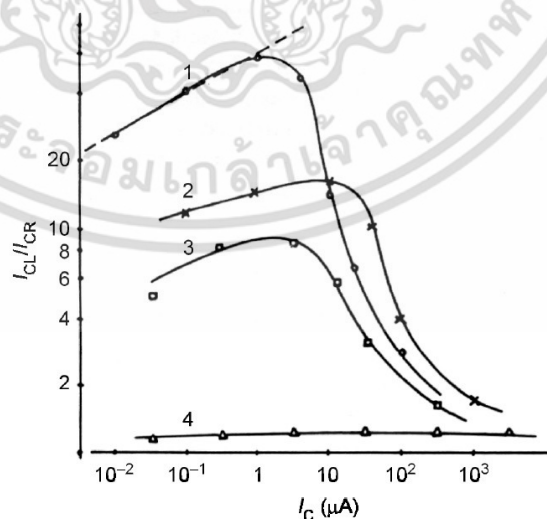
โดยที่ I_E คือกระแสอิมิตเตอร์ทั้งหมด, t คือ ความหนาของพื้นที่เบส การอ้างอิงในรูปที่ 2.26 สามารถประเมินความหนาได้โดย

$$b_1 \ll t \ll b_2 \quad (2.55)$$

สมการที่ (2.56) สำหรับอุปกรณ์ฮอลล์แบบ point-contact กระแสคอลเลคเตอร์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ปกติหาได้โดย

$$I_C = I_S \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right) \quad (2.56)$$

โดยที่ I_S คือพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์, V_{EB} คือ แรงดันไฟฟ้าอิมิตเตอร์-เบส



รูปที่ 2.27 อัตราส่วนของกระแสคอลเลคเตอร์ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์รูปที่ 2.26 [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.27 แสดงอัตราส่วนของกระแสคอลเลคเตอร์ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างรูปที่ 2.26 ที่มีความสัมพันธ์กับกระแสคอลเลคเตอร์เฉลี่ยที่ $B = 1T$ เส้นกราฟที่ 1,2,3 แสดงประสิทธิภาพระดับต่ำ เส้นกราฟที่ 4 แสดงประสิทธิภาพอิมิตเตอร์แบบปกติ เส้นกราฟที่ 1 และ 2 มีวงแหวนสารกึ่งตัวนำชนิดพี เส้นกราฟที่ 3 และ 4 ไม่มีวงแหวนชนิดพี กราฟเส้นรอบประตามทฤษฎีที่ $t = 37 \mu m$ กระแสคอลเลคเตอร์ด้านซ้ายและด้านขวาของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตามโครงสร้างรูปที่ 2.26 สามารถหาได้โดย

$$I_{CL} \approx I_S \exp \left(\frac{q(V_{EB} + \frac{1}{2}V_H)}{kT} \right) \quad (2.57)$$

$$I_{CR} \approx I_S \exp \left(\frac{q(V_{EB} + \frac{1}{2}V_H)}{kT} \right) \quad (2.58)$$

อัตราส่วนของกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองนี้สามารถหาได้โดย

$$\frac{I_{CL}}{I_{CR}} = \exp \left(\frac{qV_H}{kT} \right) \quad (2.59)$$

รูปที่ 2.27 แสดงผลการทดลองอัตราส่วนผลการวัดของกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองอุปกรณ์ที่แตกต่างกันที่สนามแม่เหล็ก $B=1T$ สมการที่ (2.57)-(2.58) เป็นการพล็อตเป็นเส้นตรงรอยประกระแสคอลเลคเตอร์ค่าต่ำเกิดจากผลของกระแสการฉีดกับการเปรียบเทียบผลการทดลอง ที่กระแสคอลเลคเตอร์ขนาดเล็กระดับการฉีดในพื้นที่เบสมีสมการที่เหมาะสมสำหรับสัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถหาได้โดย

$$|R_H| = r_H / qn \quad (2.60)$$

โดยที่ $V_H = I_E$ และ $R_H \neq f(I_E)$

ในกรณีกระแสคอลเลคเตอร์มีค่าสูงเป็นผลจากแรงดันไฟฟ้าอิมิตเตอร์ -เบสถูกทำให้เพิ่มขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพของอิมิตเตอร์สูงขึ้นเช่นเดียวกัน ที่แรงดัน $V_{EB} \gg V_x$ ระดับการฉีดพาหะในพื้นที่เบสกลายเป็นระดับที่สูงดังนั้นในพื้นที่เบสความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าเท่ากัน $n=p$ และค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์มีค่าลดลงสามารถหาได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_H = \frac{1-b}{1+b} \cdot \frac{1}{qp} \quad (2.61)$$

$$\text{โดยที่ } x = \frac{n}{p} = 1, s = \frac{r_{Hn}}{r_{Hp}} = 1 \text{ และ } b = \frac{\mu_n}{\mu_p} \\ I_E = P \quad (2.62)$$

ทำการแทนสมการที่ 2.61 และ 2.62 ลงในสมการที่ 2.59 จะได้

$$V_H = \text{const} \tan t \times B(V_{EB} \gg V_x) \quad (2.63)$$

เพราะฉะนั้นแรงดันฮอลล์ไม่ขึ้นกับกระแสอิมิตเตอร์ แต่ในกรณีที่ $V_{EB} \gg V_x$ ค่าความต้านทานของรอยต่ออิมิตเตอร์-เบสเริ่มลดลง ผลของการลัดวงจรกลายเป็นส่วนที่เกิดขึ้นและแรงดันฮอลล์เริ่มลดลงไปยิ่งขึ้น ผลของผลกระทบทั้งสองนี้ทำให้ค่าความไวของแมกนีโตทรานซิสเตอร์น้อยลงที่กระแสสูงซึ่งแสดงในรูปที่ 2.27 โดยที่กระแสสูงขึ้นกราฟทั้งหมดมีแนวโน้มเหมือนกับกราฟที่ 4 ซึ่งเป็นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์กับการลัดวงจรอิมิตเตอร์ ขนาดที่เล็กแต่ยังคงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แต่ไม่เกี่ยวเนื่องผลของกระแสการฉีด

ในพื้นที่เบสของทรานซิสเตอร์แบบปกติใกล้เคียงกับประสิทธิภาพของอิมิตเตอร์แบบปกติ สนามไฟฟ้าฮอลล์ไม่เกิดขึ้น นั่นคือกระแสของพาหะส่วนมากมีขนาดเล็กมาก และสนามไฟฟ้าฮอลล์กลายเป็นกระแสพาหะส่วนน้อยซึ่งเป็นผลของการลัดวงจร ผลการจำลองและการวัดผลถูกรายงานการนำเสนอสนามฮอลล์ที่มีขนาดเล็กตลอดจนประสิทธิภาพอิมิตเตอร์ระดับสูงของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ อย่างไรก็ตามสนามฮอลล์นี้มีบทบาทสำคัญในค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

2.4 คุณสมบัติทั่วไปของอุปกรณ์เซนเซอร์

การนำอุปกรณ์เซนเซอร์ไปใช้งานโดยทั่วๆ ไปนั้น มีเงื่อนไขในการใช้งานอย่างปกติเช่น ที่อุณหภูมิ, ความชื้น, แรงดัน เพื่อให้สามารถนำเซนเซอร์ไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง เหมาะสม และเกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยในเซนเซอร์ทั่วๆ ไป ค่าเงื่อนไขการใช้งานอย่างปกติมีความหมายดังนี้

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

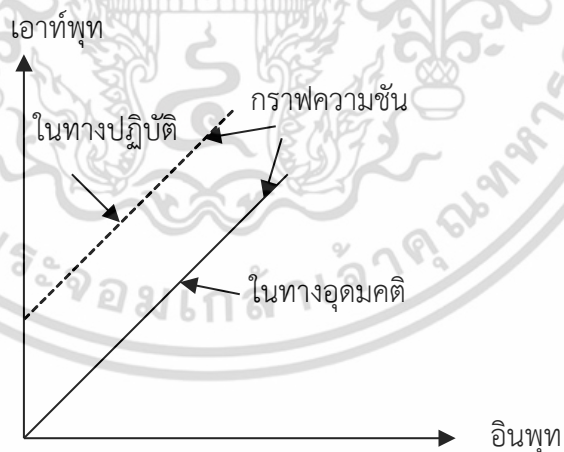
2. ความผิดพลาด (Error) เนื่องจากขั้นตอนดำเนินการ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด จะไม่สมบูรณ์แบบในทางปฏิบัติดังนั้นจะเกิดความแตกต่างขึ้นระหว่างผลที่ได้จากการวัด และค่าจริงของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ในการนำมาใช้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณที่ถูกวัด ความแตกต่างนี้เรียกว่า “ความผิดพลาด” ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถหาค่าผิดพลาดในการวัดอย่างแน่นอนได้ ดังนั้นผลที่ได้จากการวัดจึงมีความไม่แน่นอน (uncertainly) รวมอยู่ด้วยเสมอ

3. ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) ในการวัดค่า ความแม่นยำและความเที่ยงตรง 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 อัตราส่วนของสัญญาณเอาต์พุตหรือการตอบสนองของอุปกรณ์วัดต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุต หรือค่าที่ถูกวัด เช่น อุปกรณ์วัดอุณหภูมิตัวหนึ่งซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานมีความไวเป็น $0.5 \Omega/^{\circ}\text{C}$ เป็นต้น

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



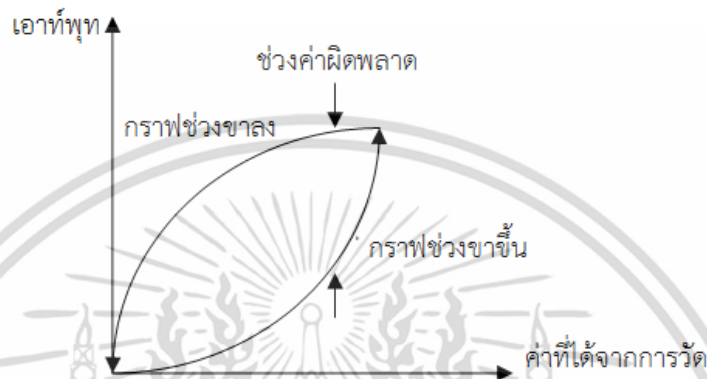
รูปที่ 2.28 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ในทางอุดมคติ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคลาดเคลื่อนอาจจะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์เต็มย่านวัดก็ได้ คำว่า การคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์เป็น ศูนย์ถูกนำมาใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏขึ้นที่เอาท์พุท เมื่ออินพุทมีค่าเป็นศูนย์

7. ฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis) การที่อุปกรณ์วัดให้ค่าสัญญาณเอาท์พุทที่แตกต่างไปจากค่า เดิมกล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงอาจมีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลงอย่างต่อเนื่อง ผลที่เกิดจากเหตุการณ์นี้ เรียกว่า ฮิสเตอร์รีซิส ซึ่งค่าที่เกิดขึ้นนี้ถือว่าเป็นความผิดพลาด



รูปที่ 2.29 ฮิสเตอร์รีซิสสัญญาณเอาท์พุทที่แตกต่างไปจากค่าเดิม

8. การแยกชัด (Resolution or Discrimination) บอกถึง คุณภาพซึ่งแสดงถึงลักษณะ จำเพาะของความสามารถของอุปกรณ์วัดในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเล็กๆ ของปริมาณที่ ถูกวัด

9. ออฟเซ็ท (Offset) เป็นค่าเอาท์พุทของเซนเซอร์ ที่ไม่ต้องการที่อุณหภูมิห้อง หรือที่ สัญญาณอินพุทเป็นศูนย์ ในกรณีของอุปกรณ์ฮอลล์ค่าออฟเซ็ท หมายถึง ค่าแรงดันฮอลล์ในขณะที่ สนามแม่เหล็กเท่ากับศูนย์

10. ความเร็วในการตอบสนอง (Speed of Response) แสดงถึงเวลาที่เอาท์พุทมีค่าอยู่ใน 63% ของค่าสุดท้ายที่ทำการการตอบสนองของอุปกรณ์เซนเซอร์ในการวัดทดลอง

โดยปกติแล้วในการออกแบบกระบวนการสร้างและการทดสอบของอุปกรณ์เซนเซอร์ในความ เป็นจริงจะมีคุณสมบัติไม่เป็นอุดมคติเพราะฉะนั้นจึงเป็นหน้าที่ของนักออกแบบและนักวิจัยที่จะ พัฒนาอุปกรณ์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงหรือเข้าใกล้ความเป็นอุดมคติมากที่สุด โดยรายละเอียด คุณสมบัติของเซนเซอร์ในทางอุดมคติสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดคุณลักษณะของเซนเซอร์ในทางอุดมคติ

คุณลักษณะ	ค่าในทางอุดมคติ
Response, Δy	มีความเป็นเชิงเส้นและไม่มีสัญญาณรบกวน
Sensitivity, S	มีค่าสูง และคงที่ตลอดย่านการทำงาน
Response time, T	เท่ากับศูนย์สำหรับผลตอบสนองชั่วขณะ
Frequency band-width	เท่ากับอนันต์สำหรับผลตอบสนองชั่วขณะ
Resolution	เท่ากับอนันต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

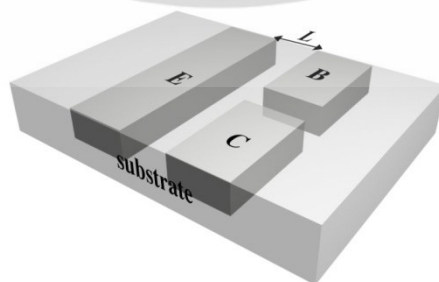
การออกแบบและกระบวนการสร้าง

ในบทนี้กล่าวถึงโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาและแมกนีโตทรานซิสเตอร์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กในสามทิศทาง อธิบายกลไกการทำงานและ การจำลองการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา แนวความคิดการพัฒนาสู่แมกนีโตทรานซิสเตอร์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามทิศทางและกลไกการทำงานของอุปกรณ์ อธิบายความสัมพันธ์ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสไบอัสอิมิตเตอร์ที่มีผลต่อค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก อธิบายการออกแบบอุปกรณ์และกระบวนการผลิตบนพื้นฐานของเทคโนโลยีซีมอส

3.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

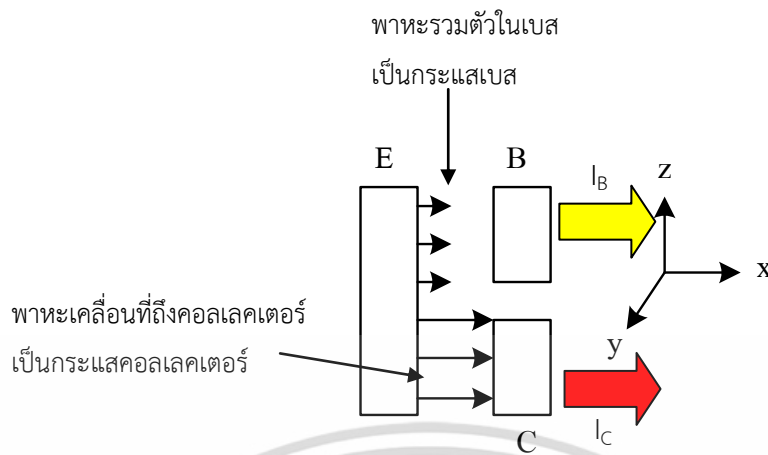
แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่เป็นพื้นฐานของการพัฒนาแมกนีโตทรานซิสเตอร์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามทิศทาง โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาแสดงดังรูปที่ 3.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างสามขานี้เป็นการพัฒนารูปแบบโครงสร้างเพื่อลดความยุ่งยากการไบอัสและสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวนอนเป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน ประกอบด้วยอิมิตเตอร์ E, เบส B และคอลเลคเตอร์ C [10-14]

แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในทิศทางแนวตั้งและแนวนอน โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัวในเบส (Recombination) เป็นกระแสเบสและพาหะเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลคเตอร์เป็นกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB}) กลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสองอาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier deflection) โดยไม่มีผลของกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (Modulation current injection) พิจารณาจากรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ทิศทางกระแสไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

รอยต่ออิมิตเตอร์ -เบสได้รับแรงดันไปข้างหน้าทำให้พาทะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปสู่เบส กลายเป็นกระแสอิมิตเตอร์โดยแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสสามารถแสดงกระแสอิมิตเตอร์โดยการ รวมกันของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์แสดงได้ดังสมการที่ (3.1)

$$I_E = I_B + I_C \tag{3.1}$$

สมการความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสสามารถหาได้จาก อัตราส่วนระหว่างความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB}) กับความหนาแน่น สนามแม่เหล็กแสดงได้ดังสมการที่ (3.2) [10-14]

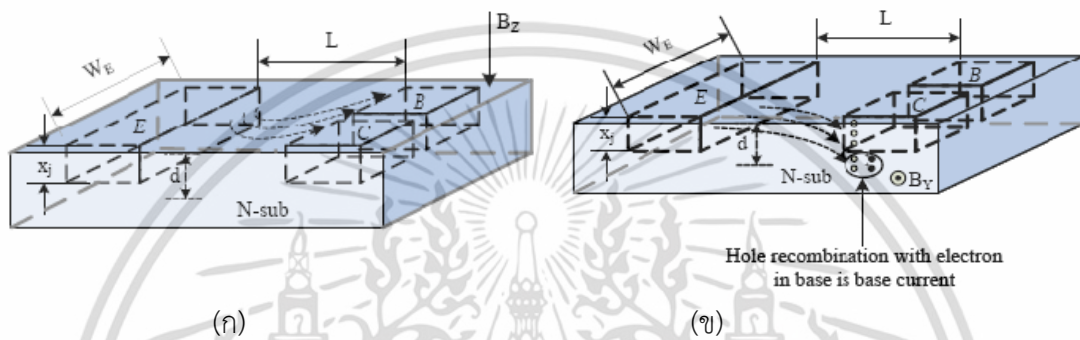
$$S = \frac{\Delta I_{CB}}{\Delta B} \tag{3.2}$$

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

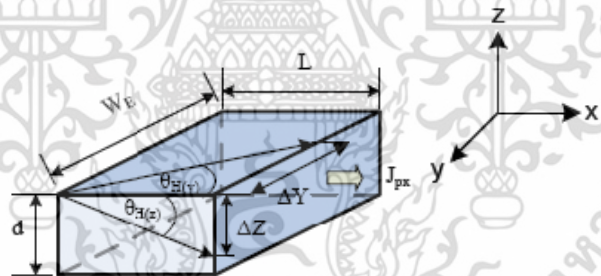
$$S \propto \Delta I_{CB} \cdot L \cdot \mu_p \tag{3.3}$$

จากสมการที่ (3.3) แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีความสัมพันธ์กับระยะความ กว้างเบส L โดยที่ไม่มีผลของระยะ W เนื่องจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาอาศัยพาทะที่รวมตัวใน เบสเป็นกระแสเบสระยะการเบี่ยงเบนจึงไม่มีผลต่อเอาท์พุทของอุปกรณ์เสมือนระยะ W เท่ากับศูนย์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในการออกแบบระยะความยาวเบส L กำหนดที่ระยะระหว่าง $10-20 \mu\text{m}$ รูปที่ 3.3(ก) แสดงการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง ซึ่งผลของสนามแม่เหล็กเป็นผลให้พาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปสะสมที่ขั้วเบสทำให้กระแสเบสสูงขึ้นและกระแสคอลเลกเตอร์มีค่าน้อยลง รูปที่ 3.3(ข) แสดงการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวอนซึ่งพาหะส่วนมากในอิมิตเตอร์เคลื่อนที่ไปรวมตัวกับพาหะส่วนมากในเบส (Recombination) รูปที่ 3.4แสดงพื้นที่การเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งและแนวอนโดยการวิเคราะห์ตามมิติโครงสร้างของอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์



รูปที่ 3.3 ทิศทางการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะ (ก) การตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งและ (ข) การตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวอน



รูปที่ 3.4 การวิเคราะห์พื้นที่การเบี่ยงเบนของพาหะในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งและแนวอน

การตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งสามารถวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.4)

$$\Delta I_{CB(v)} = J_{px} \cdot d \cdot \Delta W_E \tag{3.4}$$

โดยที่ J_{px} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และ d คือความลึกกรอยต่อ

จะได้
$$\Delta W_E = \Delta Y = \mu \cdot L \cdot B_z \tag{3.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (3.5) ลงในสมการที่ (3.4)

ได้สมการความสัมพันธ์การตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งดังสมการที่ (3.6)

$$\Delta I_{CB(v)} = J_{px} \cdot d \cdot L \cdot \mu \cdot B_Z \quad (3.6)$$

การตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวอนสามารถวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.7)

$$\Delta I_{CB(l)} = J_{px} \cdot \Delta d \cdot W_E \quad (3.7)$$

จะได้

$$\Delta d = \Delta Z = \mu \cdot L \cdot B_Y \quad (3.8)$$

แทนสมการ (3.8) ลงในสมการที่ (3.7)

ได้สมการความสัมพันธ์การตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวอนดังสมการที่ (3.9)

$$\Delta I_{CB(v)} = J_{px} \cdot d \cdot L \cdot \mu \cdot B_Z \quad (3.9)$$

โดยที่ L คือ ระยะระหว่างอิมิตเตอร์และเบสคอลเลคเตอร์

สมการค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (3.10)

$$S_R = \frac{\Delta I_{CB}}{I_E \cdot \Delta B} \quad (3.10)$$

โดยที่ ΔI_{CB} คือความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์

I_E คือ กระแสไบอัสอิมิตเตอร์

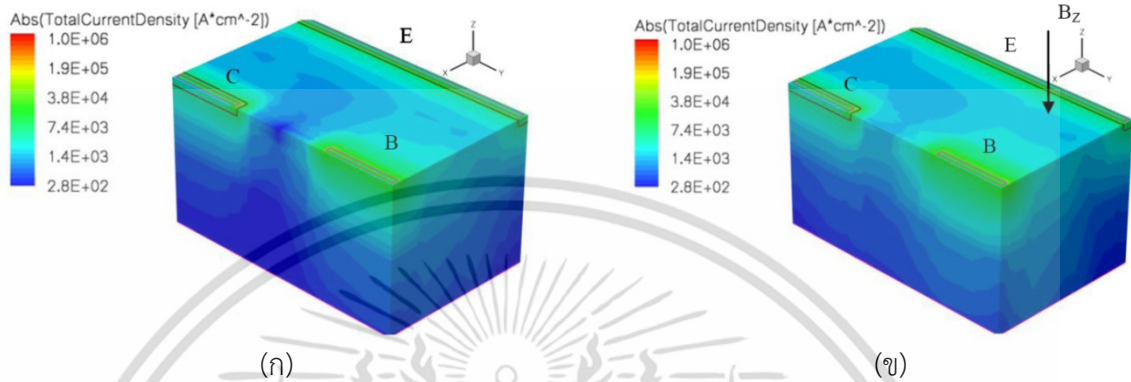
ΔB คือ การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

3.2 การจำลองการทำงานแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

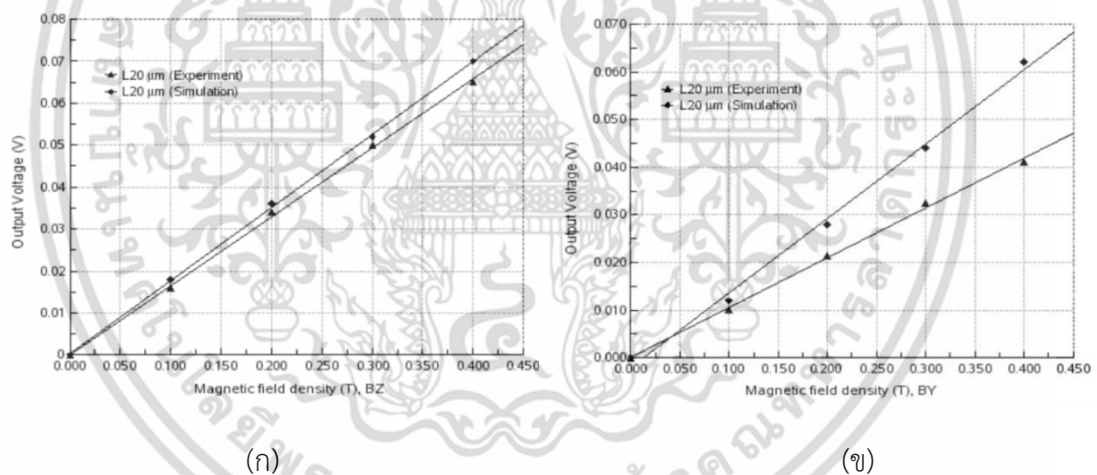
3.2.1 การจำลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง

รูปที่ 3.5 แสดงการจำลองการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา โครงสร้างของอุปกรณ์ทำการจำลองสร้างจากโปรแกรม TCAD Sentaurus โดยขั้วอิมิตเตอร์มีความยาวครอบคลุมขั้วคอลเลคเตอร์และเบส ระยะระหว่างอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ -เบส(L) กำหนดที่ 20 μm , ความลึกของรอยต่อ 1 μm ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าบริเวณขั้วทั้งสามแสดงได้โดยระดับความเข้มของสี จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 (ก) แสดงการตอบสนองสนามแม่เหล็กเป็นผลให้ความเข้มข้นระดับที่บริเวณด้านผิวหน้าของอุปกรณ์แตกต่างจากรูปที่ 3.5(ข) การตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้งทำให้ความเข้มข้นบริเวณด้านล่างของขั้วคอลเลคเตอร์และขั้วเบสมีการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกระแส โดยระดับความหนาแน่นกระแส $1.4E^3 \text{ A.cm}^{-2}$ ขยายบริเวณออกจากขั้วเบสมากขึ้น



รูปที่ 3.5 การจำลองการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (ก) ไม่มีสนามแม่เหล็กและ (ข) การตัดผ่านสนามแม่เหล็กแนวตั้ง



รูปที่ 3.6 กราฟการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตและความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (ก) สนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทางแนวตั้งและ(ข) สนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทางแนวนอน

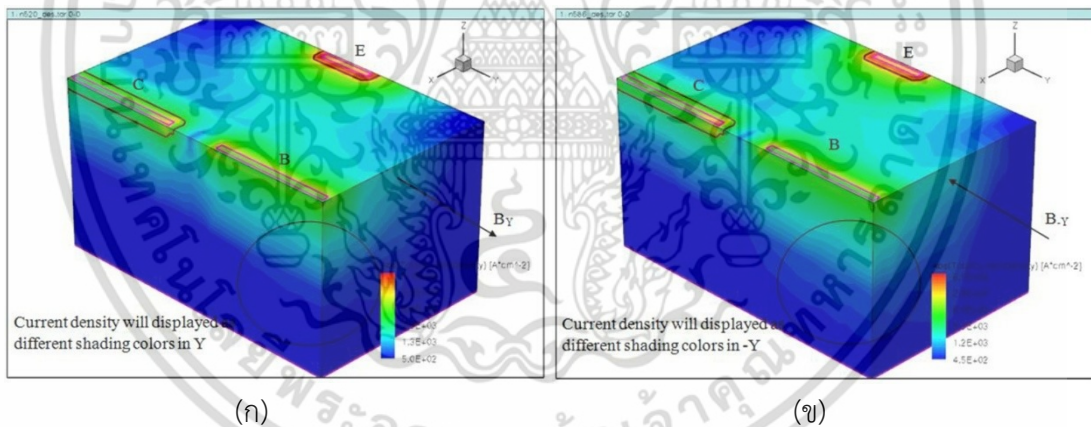
รูปที่ 3.6 (ก)-(ข) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและความต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และเบส (ΔI_{CB}) ที่แสดงในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้า V รูปที่ 3.6 (ก) แสดงการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง โดยทำการเปรียบเทียบการจำลองและการวัดทดลอง อุปกรณ์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ [10-13] จากกราฟแสดงการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่เป็นผลให้แรงดันเอาต์พุตสูงขึ้น เส้นการจำลองมีแนวโน้มเช่นเดียวกับเส้นการวัดอุปกรณ์ที่สร้างสมบูรณ์ รูปที่ 3.6 (ข) แสดงกราฟการจำลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวนอนซึ่งมีเส้นแนวโน้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นเดียวกับรูปที่ 3.6(ก) จากผลการจำลองแสดงถึงแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาที่สามารถตอบสนองสนามแม่เหล็กได้ในทิศทางแนวตั้งและแนวนอน

3.2.2 การจำลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวนอน

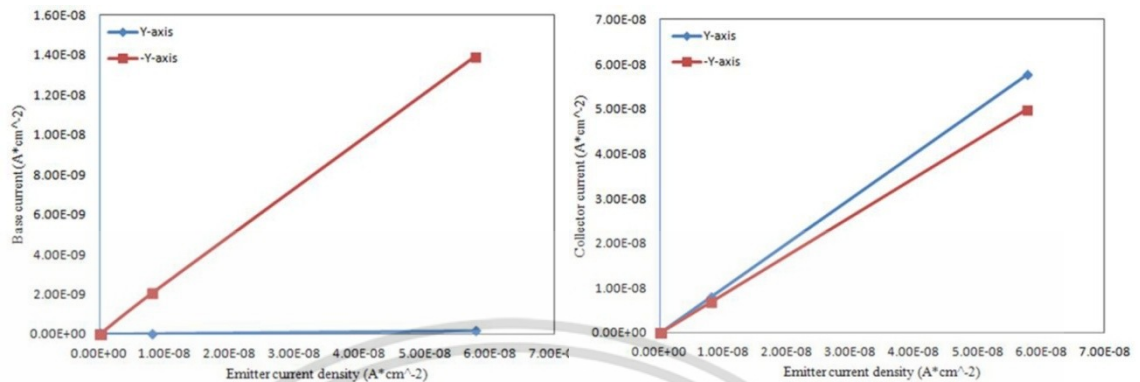
รูปที่ 3.7 แสดงการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวนอนซึ่งเปรียบเทียบกับทิศทางสนามแม่เหล็กแนวนอนที่มีทิศทางตรงข้ามกัน รูปที่ 3.7(ก) ทิศทาง B_y และ รูปที่ 3.7 (ข) ทิศทาง B_{-y} ความแตกต่างของกระแสไฟฟ้าแสดงได้ด้วยระดับของสีบริเวณด้านล่างของขั้วคอลเลคเตอร์และขั้วเบส สำหรับการจำลองกำหนดค่าความกว้างอิมิตเตอร์ (W_E) มีค่า $10 \mu\text{m}$ ระยะระหว่างขั้วอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์และเบส มีค่า $30 \mu\text{m}$ ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (B) 0.1 T ความหนาแน่นอะตอมสารเจือขั้วอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์มีค่า $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ และที่ขั้วเบสมีค่า $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ระดับความเข้มข้นของรูปที่ 3.7 แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะจากขั้วอิมิตเตอร์ไปขั้วคอลเลคเตอร์และเบสซึ่งทำการทดลองที่สนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตรงข้ามกันในแนวนอนกับผิวหน้าของอุปกรณ์ ความแตกต่างของระดับสีเกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของขั้วเบสแสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.7 การจำลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (ก) B_y และ (ข) B_{-y}

รูปที่ 3.8 (ก) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสอิมิตเตอร์และกระแสเบส โดยเปรียบเทียบระหว่างทิศทาง B_y และ B_{-y} กระแสเบสในทิศทาง B_y มีค่าสูงตามการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแสอิมิตเตอร์ รูปที่ 3.8 (ข) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสอิมิตเตอร์และกระแสคอลเลคเตอร์ซึ่งกราฟของ B_y และ B_{-y} มีค่าใกล้เคียงกัน ผลการจำลองแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสที่ขั้วคอลเลคเตอร์และเบสในขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

ทิศทางตรงข้ามของสนามแม่เหล็กมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแสอิมิตเตอร์มีผลการเปลี่ยนแปลงของกระแสสูงชันเช่นเดียวกัน



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.8 กราฟการจำลองเปรียบเทียบการตอบสนองสนามเหล็ก B_V และ $B_{V'}$ ที่ความสัมพันธ์ (ก) กระแสเบสกับกระแสอิมิตเตอร์ (ข) กระแสคอลเลคเตอร์กับกระแสอิมิตเตอร์

3.3 การออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในการตอบสนองสามทิศทาง

3.3.1 โครงสร้างและการตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_Z

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ ที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กสามทิศทางเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กในสามทิศทางคือ B_X , B_Y และ B_Z ที่มีพื้นฐานโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาโดยอาศัยเทคโนโลยีของการสร้าง CMOS โดยต้องยึดแนวคิดที่ว่า “พายุจะต้องเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็กของอิมิตเตอร์ไปสู่คอลเลคเตอร์และขั้วเบส ในสี่ทิศทาง การตัดผ่านสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X , B_Y และ B_Z เป็นผลให้พายุที่เคลื่อนที่สี่ทิศทางเกิดการเลี้ยวเบน ทำให้เกิดความแตกต่างของกระแสไฟฟ้าได้ ” โดยที่ขั้วทั้งสามคือ อิมิตเตอร์, คอลเลคเตอร์และเบส ถูกสร้างลงบนแผ่นซิลิคอน โดยที่ชนิดของแผ่นซิลิคอนต้องเป็นชนิดเดียวกับขั้วเบสเพื่อให้เกิดกลไกการรวมตัวของพายุของตัวอุปกรณ์ ซึ่งขนาดพื้นที่หน้าตัดของอิมิตเตอร์ถูกออกแบบให้สั้นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ในทางปฏิบัติเพื่อสำหรับการลดกระแสไฟฟ้าในการไบอัสแมกนีโตทรานซิสเตอร์ให้ต่ำลง ขั้วทั้ง หดถูกสร้างให้มีความลึกของรอยต่อ (x_j) ประมาณ 1-5 ไมโครเมตรโดยที่ขั้วคอลเลคเตอร์และเบส มีขนาดเท่ากันและสามารถมีการจัดรูปแบบอย่างสมมาตรเพื่อให้เกิดแรงดันออฟเซตที่น้อยที่สุด ในการสร้างชั้นออกไซด์หนาในบริเวณรอบๆขั้วทั้งหมดเพื่อเป็นการลดการเคลื่อนที่ด้านข้างของพายุซึ่งเป็นการลดกระแสรั่วของตัวอุปกรณ์อีกด้วย โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามทิศทาง สามารถออกแบบและอาศัยกระบวนการ สร้างเทคโนโลยีของการสร้าง CMOS ซึ่งมีจุดเด่นคือสามารถสร้างร่วมกับวงจรรวมได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพี ประกอบด้วย อิมิตเตอร์ 1 ขั้วสร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิดพี, คอลเลคเตอร์ 4 ขั้วสร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเบส 4 ขั้วสร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นทั้งหมดสร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น ออกแบบความกว้างอิมิตเตอร์ (W_E) มีขนาด 5 ไมโครเมตร ระยะระหว่างเบสกับคอลเลคเตอร์มีขนาด 10 ไมโครเมตรและระยะระหว่างอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์-เบส(L) มีขนาด 20 ไมโครเมตร ขั้วเบสและคอลเลคเตอร์ทั้งหมดถูกสร้างให้มีขนาดเท่ากันและสมมาตรกัน ขั้วทั้งหมดถูกล้อมรอบด้วยชั้นออกไซด์หนา (LOCOS Oxide)



รูปที่ 3.9 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามทิศทาง

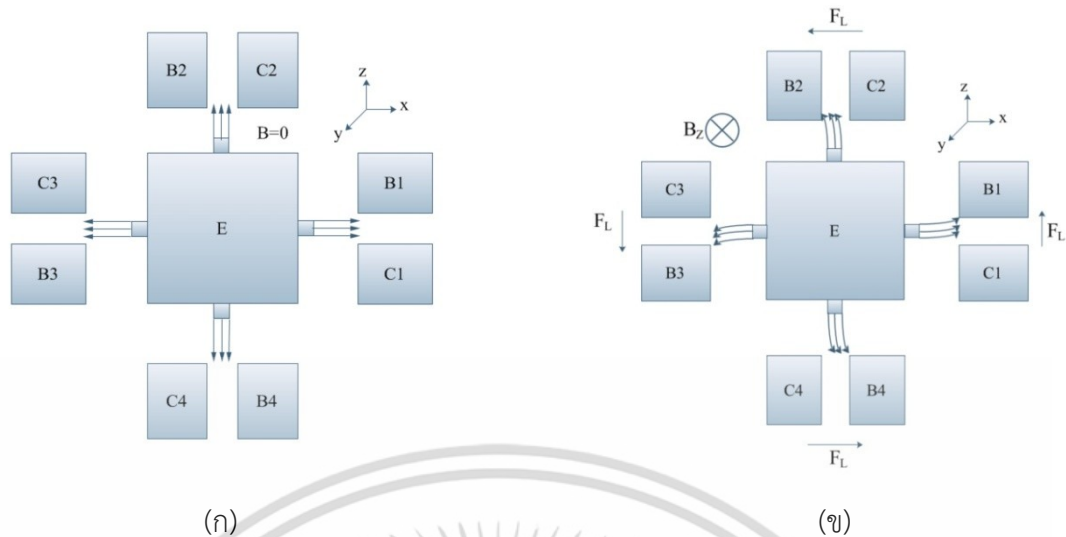
ในสภาวะปกติไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามมิติถูกไบอัสที่ขั้วอิมิตเตอร์เป็นผลให้พาหะถูกฉีดจากขั้วอิมิตเตอร์ในสี่ด้านไปที่คู่อิเล็กตรอนและเบสทั้งสองคู่ กระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์มีขนาดเท่ากัน ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ ($\Delta I_{CB}=0$) แสดงดังรูปที่ 3.10(ก) สมการความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (3.11)

$$\Delta I_{CB(Z)} = (\Delta I_{C1} + \Delta I_{C2} + \Delta I_{C3} + \Delta I_{C4}) - (\Delta I_{B1} + \Delta I_{B2} + \Delta I_{B3} + \Delta I_{B4}) \quad (3.11)$$

โดยรูปที่ 3.10(ข) แสดงการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งแกน B_z แรงลอเรนซ์เกิดขึ้นในสี่ทิศทางคือ ทิศทาง $-y$ ของคู่อิเล็กตรอน-เบสที่ 1, ทิศทาง $-x$ ของคู่อิเล็กตรอน-เบสที่ 2, ทิศทาง y ของคู่อิเล็กตรอน-เบสที่ 3, ทิศทาง x ของคู่อิเล็กตรอน-เบสที่ 4 แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะที่เคลื่อนที่ในสี่ทิศทางเป็นผลให้กระแสเบสเพิ่มขึ้นแต่กระแสคอลเลคเตอร์ลดลงเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบส ($\Delta I_{CB} > 0$) สมการที่ (3.12) แสดงสมการการเปลี่ยนแปลงกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสในการเคลื่อนที่พาหะสี่ทิศทาง

$$\Delta I_{CB(Z)} = (\Delta I_{C1} + \Delta I_{C2} + \Delta I_{C3} + \Delta I_{C4}) - (\Delta I_{B1} + \Delta I_{B2} + \Delta I_{B3} + \Delta I_{B4}) \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 การทำงานอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์(ก) ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน และ(ข) การตัดผ่านของสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z

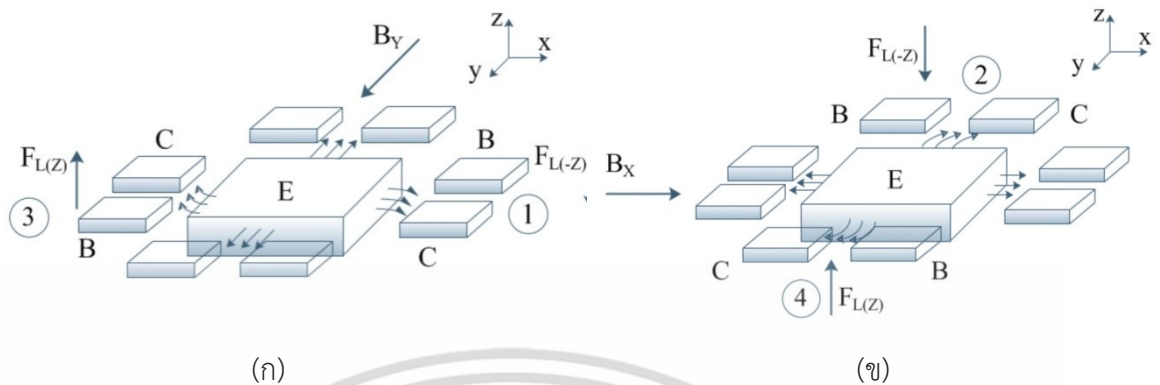
3.3.2 การตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x และทิศทาง B_y

รูปที่ 3.11(ก) แสดงการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทาง B_y แรงลอเรนซ์เกิดขึ้นในสองทิศทางคือ ทิศทาง $-z$ ของคู่คอลลเลคเตอร์-เบสที่ 1 และทิศทาง z ของคู่คอลลเลคเตอร์-เบสที่ 3 ในขณะที่คู่คอลลเลคเตอร์-เบสที่ 2 และ 4 ไม่เกิดการตอบสนองเนื่องทิศทางกระแสไฟฟ้าเป็นทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็ก สมการความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (3.13)

$$\Delta I_{CB(y)} = (\Delta I_{C1} + I_{C2} + \Delta I_{C3} + I_{C4}) - (\Delta I_{B1} + I_{B2} + \Delta I_{B3} + I_{B4}) \quad (3.13)$$

รูปที่ 3.11(ข) แสดงการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทาง B_y แรงลอเรนซ์เกิดขึ้นในสองทิศทางคือ ทิศทาง $-z$ ของคู่คอลลเลคเตอร์-เบสที่ 2 และทิศทาง z ของคู่คอลลเลคเตอร์-เบสที่ 4 ในขณะที่คู่คอลลเลคเตอร์-เบสที่ 1 และ 3 ไม่เกิดการตอบสนองเนื่องจากทิศทางกระแสไฟฟ้าเป็นทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็ก สมการความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (3.14)

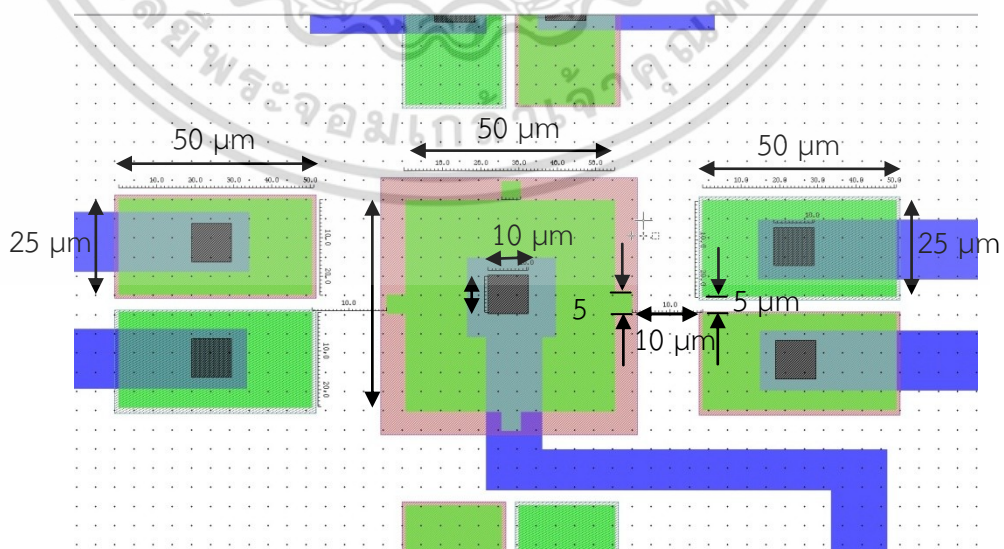
$$\Delta I_{CB(x)} = (I_{C1} + \Delta I_{C2} + I_{C3} + \Delta I_{C4}) - (I_{B1} + \Delta I_{B2} + I_{B3} + \Delta I_{B4}) \quad (3.14)$$



รูปที่ 3.11 การทำงานแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก) การตัดผ่านสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y และ (ข) การตัดผ่านสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x

3.3.3 การออกแบบลวดลายสำหรับกระจกต้นแบบ

รูปที่ 3.12 แสดงการออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ด้วยโปรแกรม L-Edit ขั้วอิมิตเตอร์ 1 ขั้ว มีความกว้างและความยาวเท่ากับ 50×50 ไมครอน ถูกล้อมรอบด้วยชั้นออกไซด์หนา (LOCOS Oxide) ทั้งสี่ด้านของขั้วอิมิตเตอร์ถูกเปิดช่องความกว้างอิมิตเตอร์ (W_E) มีขนาด 5 ไมครอน ขั้วเบส และคอลเลคเตอร์ถูกออกแบบให้มีขนาดเท่ากันและสมมาตรกัน มีความกว้างและความยาวเท่ากับ 25×50 ไมครอน ระยะระหว่างขั้วอิมิตเตอร์และขั้วคอลเลคเตอร์ -เบสมีความยาว (L) เท่ากับ 10 ไมครอน ระยะระหว่างขั้วคอลเลคเตอร์และขั้วเบส (W) เท่ากับ 5 ไมครอน การออกแบบสำหรับการเปิดช่องคอนแทคมีขนาด 10×10 ไมครอน



รูปที่ 3.12 การออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ด้วยโปรแกรม L-Edit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจกต้นแบบสำหรับกระบวนการผลิตแมกนีโททรานซิสเตอร์ ถูกออกแบบตามกระบวนการผลิตที่อยู่บนพื้นฐานของเทคโนโลยีซีมอส 0.5 ไมครอน ประกอบด้วย 6 เลเยอร์คือ Active area, N-Select, P-Select, Contact, Metal และ Passivation ดังแสดงรูปที่ 3.13 ซึ่งทั้งหมดถูกสร้างกระจกต้นแบบตามกระบวนการสร้างดังนี้

มาส์คที่ 1 : Active Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สำหรับเพื่อสร้าง พื้นที่ในการสร้างอุปกรณ์ และพื้นที่ที่ถูกล้อมรอบด้วยชั้นออกไซด์หนาแสดงดังรูปที่ 3.13 (ก)

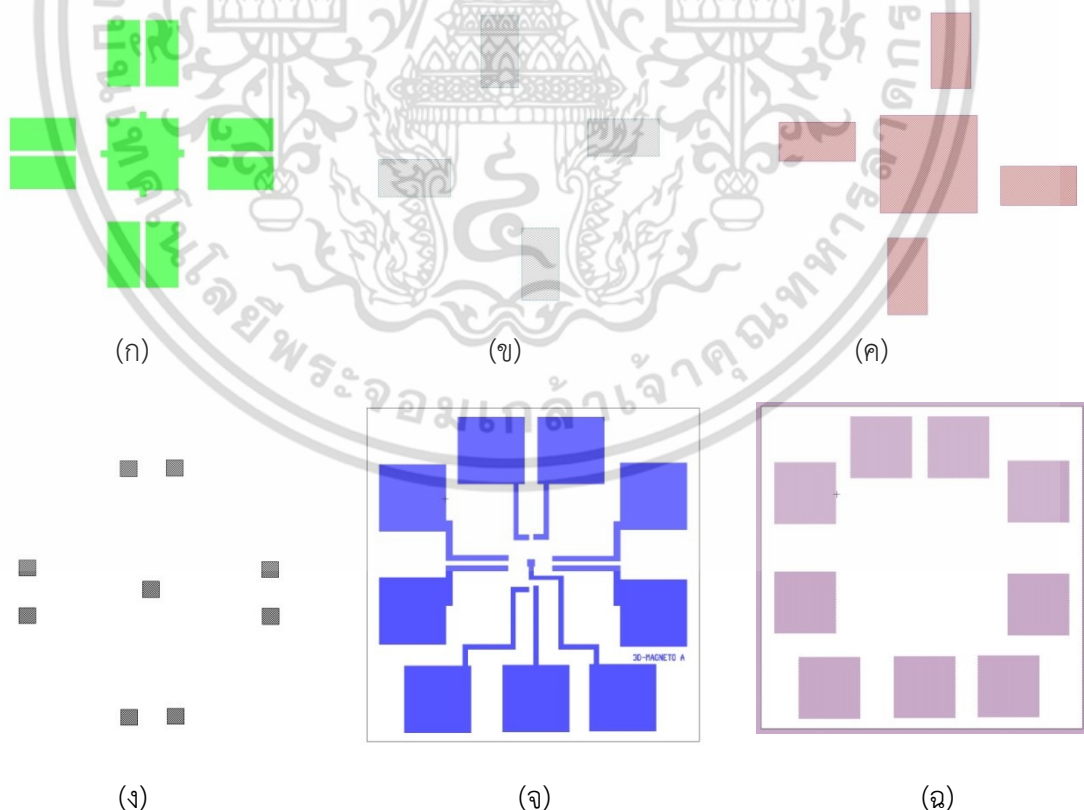
มาส์คที่ 2 : N- select Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สำหรับการเปิดช่องออกไซด์และทำการยิงฝังประจุอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส (N^+) เพื่อสร้างขั้วเบสแสดงดังรูปที่ 3.13 (ข)

มาส์คที่ 3 : P-select Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สำหรับการเปิดช่องออกไซด์และทำการยิงฝังประจุอะตอมสารเจือโบรอน (P^+) เพื่อสร้างขั้วคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.13 (ค)

มาส์คที่ 4 : Contact Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สำหรับการเปิดช่องออกไซด์ในการเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่การยิงอะตอมสารเจือและชั้นโลหะแสดงดังรูปที่ 3.13 (ง)

มาส์คที่ 5 : Metal Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สำหรับการ สร้างลวดลายโลหะสำหรับการเชื่อมต่อใช้งานอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.13 (จ)

มาส์คที่ 6 : Passivation Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สำหรับการ สร้างลวดชั้นป้องกันผิวหน้าของอุปกรณ์และสร้างพื้นที่สำหรับการเชื่อมต่อ Wire Bonding แสดงดังรูปที่ 3.13 (ฉ)



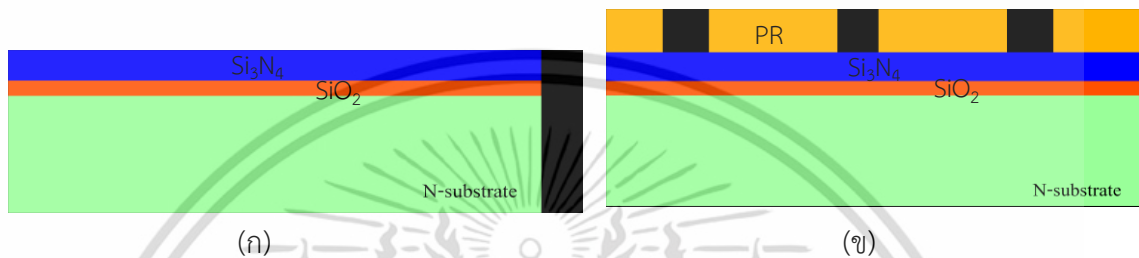
รูปที่ 3.13 การออกแบบเลเยอร์ต่างๆในกระบวนการผลิตกระจกต้นแบบสำหรับกระบวนการสร้าง

แมกนีโททรานซิสเตอร์

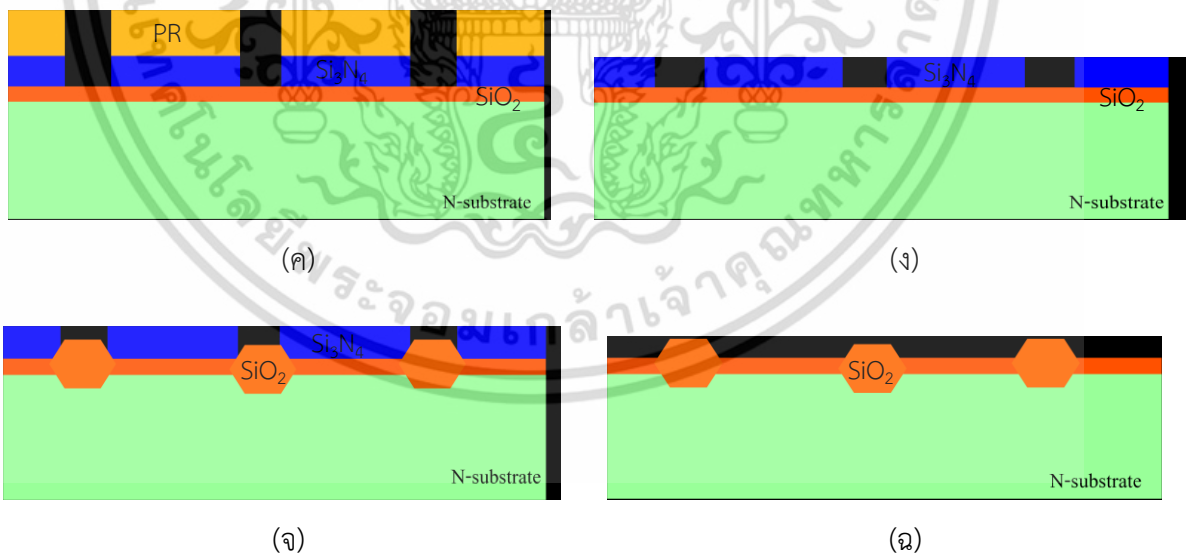
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์

รูปที่ 3.14 แสดงกระบวนการผลิตแมกนีโตทรานซิสเตอร์ด้วยเทคโนโลยีซีมอส รูปที่ 3.14(ก) นำฐานรองชนิดเอ็นค่าความต้านแผ่น 20-30 Ω -cm ทำการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ความหนา 15 นาโนเมตรและฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ความหนา 150 นาโนเมตร รูปที่ 3.14(ข) กระบวนการสร้างลวดลายวงจร (Photolithography) เพื่อเปิดลวดลายบริเวณ Active area ทำการเคลือบน้ำยาไวแสง PR (Coat), ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ (Expose) และ ทำการล้างด้วยน้ำยา Developer



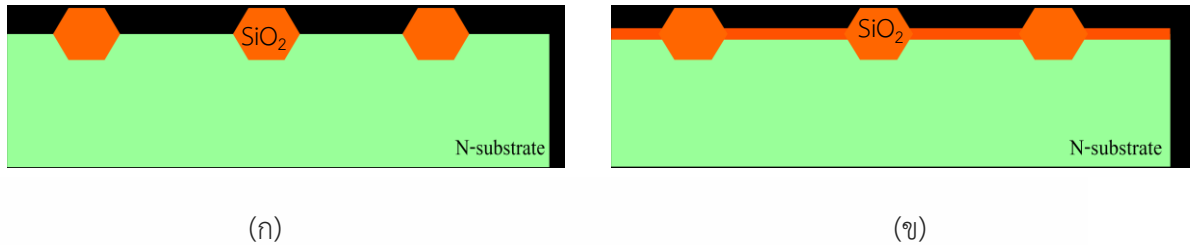
รูปที่ 3.14(ค) กระบวนการกัดชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) จากนั้นทำการล้างน้ำยาไวแสงออกจากแผ่นด้วยสารละลาย Piranha และ กระบวนการ Ashing ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ง) กระบวนการสร้างชั้นออกไซด์หนา (LOCOS Oxide) ที่ความหนา 650 นาโนเมตรและทำการลอกชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ออกจากแผ่นเวเฟอร์ด้วยสารละลายฟอสฟอริก ดังแสดงในรูปที่ 3.14(จ)-(ฉ)



รูปที่ 3.14 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก) สร้างชั้นฟิล์ม, (ข) สร้างลวดลายวงจร Active Area, (ค) การกัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์, (ง) การลอกน้ำยาไวแสง, (จ) การสร้างชั้นออกไซด์หนาและ (ฉ) การกัดชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์

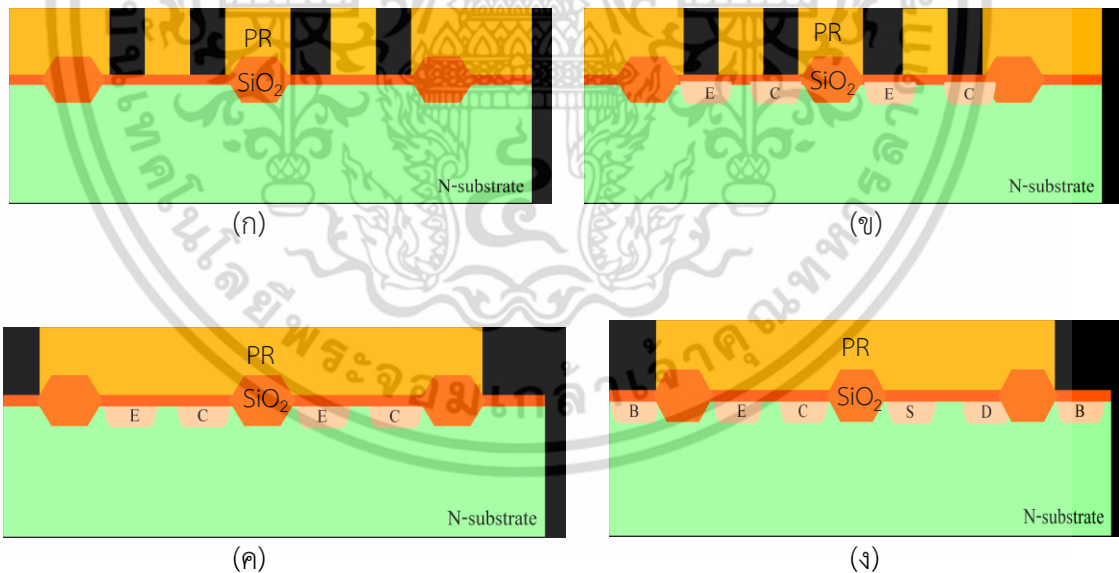
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการกัดชั้นออกไซด์ความหนา 15 นาโนเมตรด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออริก (HF) จากนั้นสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นมาอีกครั้งที่ความหนา 25 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.15(ก)-(ข)



รูปที่ 3.15 กระบวนการสร้างแมกนีไทเทรียนซิสเตอร์ (ก) การกัดชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์และ (ข) การสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์

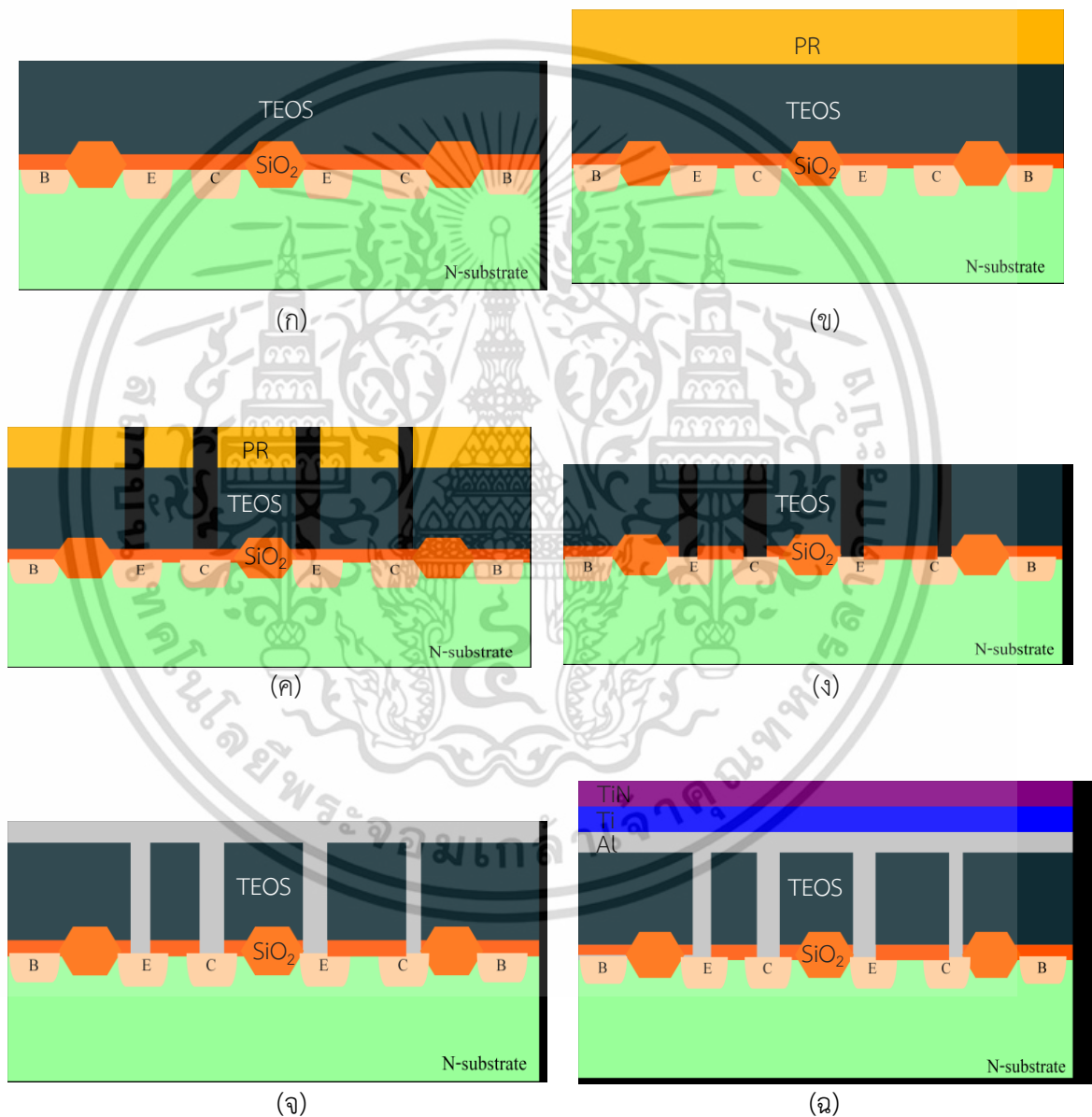
กระบวนการสร้างลวดลายวงจรถ่าย P-Select เพื่อเปิดช่องในการยิงฝังประจุโบรอนที่ปริมาณอะตอมสารเจือ $3E15$ อะตอม/ตร.ซม ในการสร้างขั้วอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.16 (ก)-(ข) จากนั้นกระบวนการสร้างลวดลายวงจรถ่าย N-Select เพื่อเปิดช่องในการยิงฝังประจุฟอสฟอรัสที่ปริมาณอะตอมสารเจือ 1×10^{16} อะตอม/ตร.ซม เพื่อสำหรับสร้างขั้วเบสดังแสดงในรูปที่ 3.16 (ค)-(ง)



รูปที่ 3.16 กระบวนการสร้างแมกนีไทเทรียนซิสเตอร์ (ก) กระบวนการสร้างลวดลายวงจรถ่าย P-Select เพื่อเปิดช่องในการยิงฝังประจุโบรอน, (ค) กระบวนการสร้างลวดลายวงจรถ่าย N-Select เพื่อเปิดช่องในการยิงฝังประจุฟอสฟอรัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

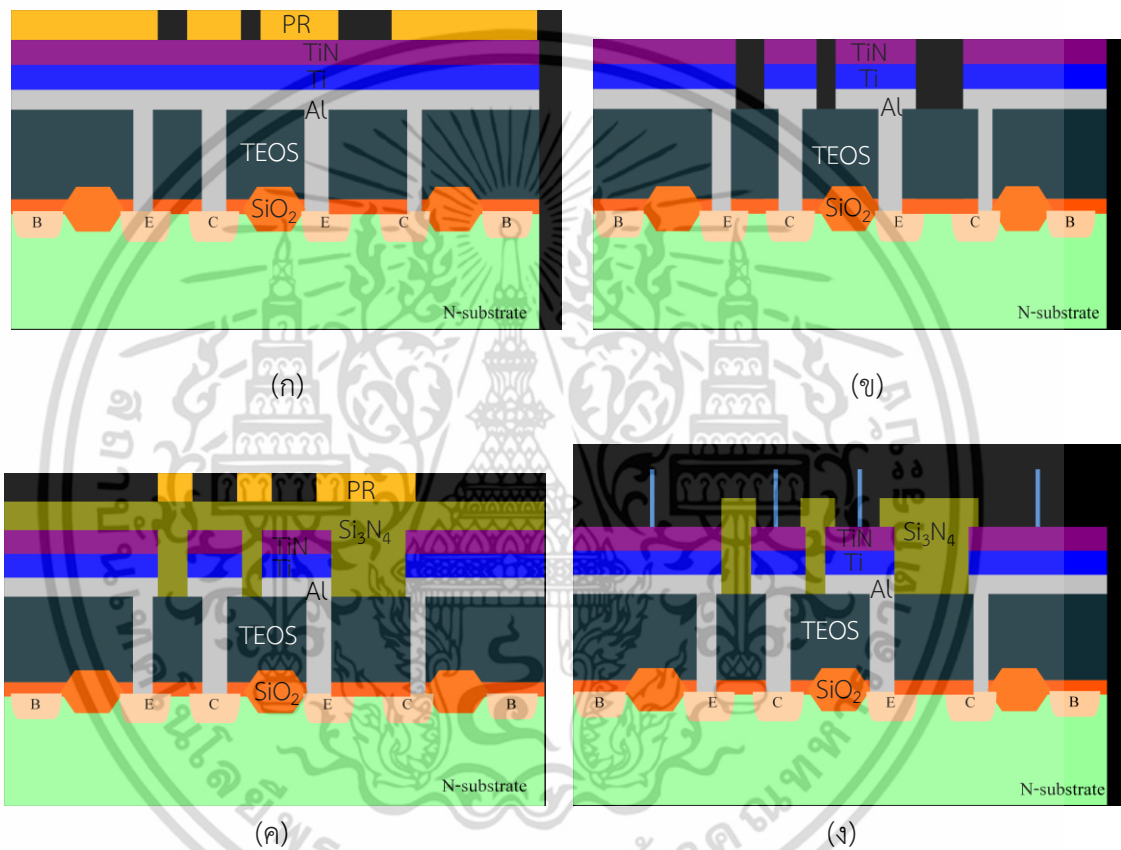
รูปที่ 3.17 (ก) กระบวนการสร้างฟิล์ม TEOS ด้วยกระบวนการสร้างชั้นฟิล์มด้วยไอสารเคมี ความดันต่ำ (Low Pressure Chemical Vapor Deposition: LPCVD) ความหนา 500 นาโนเมตร และกระบวนการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการ Plasma Enhance Chemical Vapor Deposition: PECVD) ความหนา 500 นาโนเมตร กระบวนการสร้างลวดลายวงจรถ่ายเงา Contact จากนั้นทำการกัดชั้นฟิล์มความหนา 1000 นาโนเมตรและทำการลอกน้ำยาไวแสงออกจาก แผ่นเว-เฟอร์ ดังแสดงรูปที่ 3.17 (ข)-(ง) กระบวนการสร้างชั้นโลหะ อะลูมิเนียม (Al), ไททาเนียม (Ti) และไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) ด้วยกระบวนการ Sputtering ดังแสดงรูปที่ 3.17 (จ)-(ฉ)



รูปที่ 3.17 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก) กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มออกไซด์ (ข) กระบวนการสร้างลวดลายวงจรถ่ายเงา Contact, (ค) กระบวนการกัดชั้นฟิล์มออกไซด์ (ง) กระบวนการลอกน้ำยาไวแสง, (จ) กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มโลหะอะลูมิเนียม และ (ฉ) กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มโลหะไททาเนียมและไททาเนียมไนไตรด์

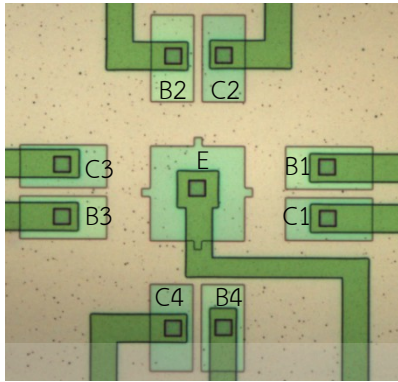
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขึ้นชื่อของสถาบันฯ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการสร้างลวดลายวงจรถนึ่งโลหะ หลังจากกระบวนการเคลือบน้ำยาไวแสง, ฉายแสงและล้างน้ำยาไวแสง ทำการกัดชั้นโลหะอะลูมิเนียม, ไททาเนียมและไททาเนียมไนไตรด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.18(ก)-(ข) กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ด้วยกระบวนการ Plasma Enhance Chemical Vapor Deposition จากนั้นกระบวนการสร้างลวดลายวงจรถนึ่งโลหะ PAD และทำการกัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์ สุดท้ายกระบวนการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 420 °C 30 นาที ได้แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามมิติที่เสร็จสมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 3.18(ค)-(ง) โดยรูปที่ 3.19 แสดงภาพถ่ายแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์

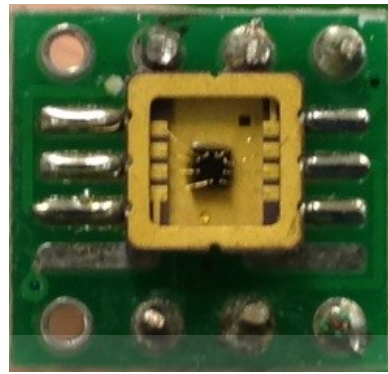


รูปที่ 3.18 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก) กระบวนการสร้างลวดลายวงจรถนึ่งโลหะ (ข) กระบวนการกัดชั้นโลหะ, (ค) กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์และการสร้างลวดลายวงจรถนึ่งโลหะ PAD, (ง) กระบวนการกัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์และกระบวนการซินเตอร์ริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.19 ภาพถ่ายแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (ก) ภาพถ่ายด้านบนด้วยกล้องไมโครสโคป และ
(ข) แมกนีโตทรานซิสเตอร์ในบรรจุภัณฑ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

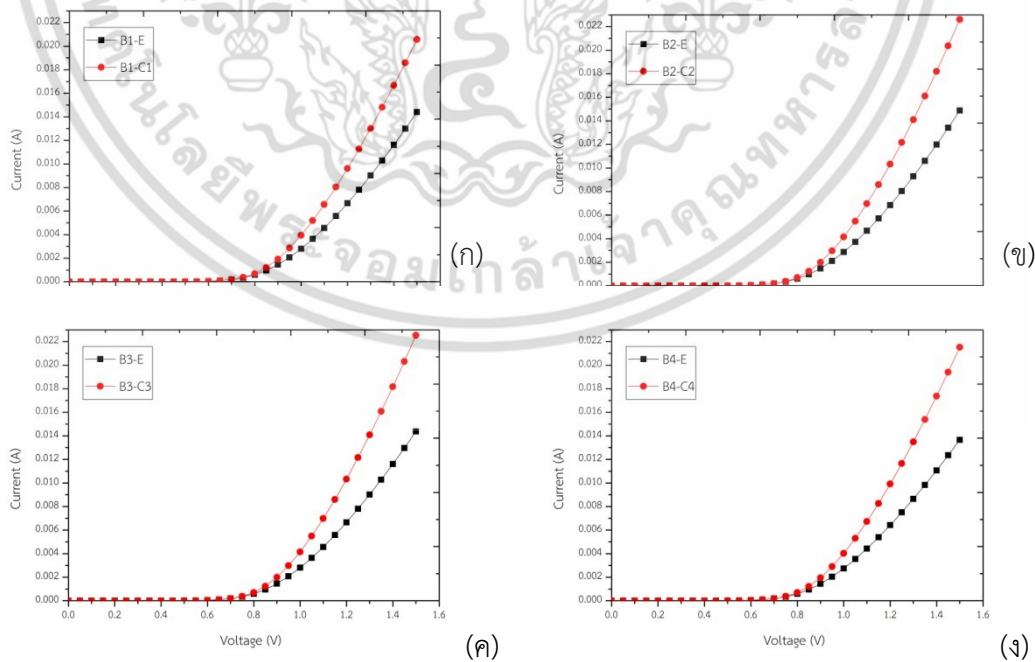
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้แสดงการทดลองและผลการทดลองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กในสามทิศทาง ผลการวัดคุณสมบัติรอยต่อของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กในสามทิศทางคือ B_x , B_y และ B_z ในการทดลองแบบตัวเดียว (Single Mode) และแบบรวม (Merge Mode) ที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ (I_E) ค่าต่างๆ อีกทั้งแสดงผลการเปรียบเทียบค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแต่ละโหมดการทำงาน , ทิศทางของสนามแม่เหล็กและกระแสอิมิตเตอร์ค่าต่างๆ รวมถึงการวิเคราะห์กลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์อีกด้วย

4.1 คุณสมบัติรอยต่อของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

การวัดคุณสมบัติรอยต่อพี-เอ็นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นการวัดทดสอบเบื้องต้นเพื่อแสดงคุณสมบัติรอยต่อพี-เอ็นของอุปกรณ์ซึ่งจากกราฟ ผลการทดลองรูปที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของรอยต่อที่ขั้วใช้งานต่างๆ คือ (E-B1, E-C1), (E-B2, E-C2), (E-B3, E-C3), (E-B4, E-C4) โดยทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าตั้ง 0 ถึง 1.5 โวลต์ กราฟที่ได้แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าและแสดงความสมมาตรทางไฟฟ้าที่รอยต่อของขั้วใช้งานแมกนีโตทรานซิสเตอร์



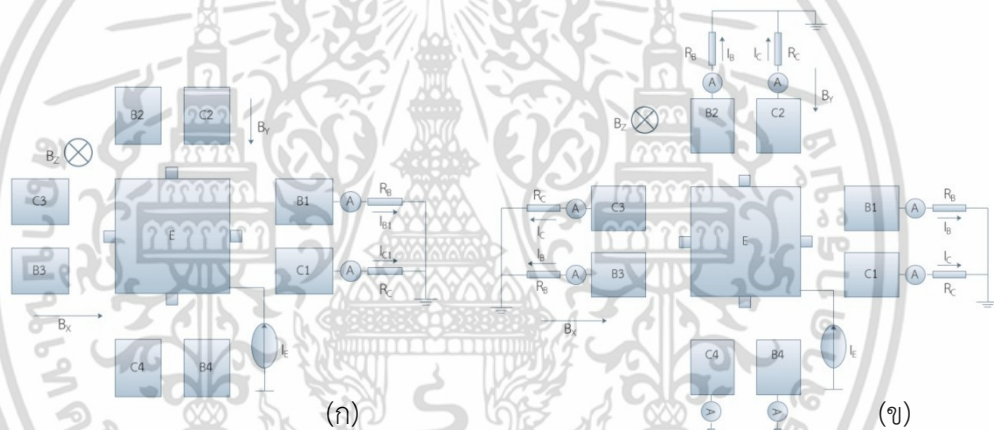
รูปที่ 4.1 คุณสมบัติรอยต่อของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่รอยต่อต่างๆ (ก) (E-B1, E-C1),

(ข) (E-B2, E-C2), (ค) (E-B3, E-C3) และ (ง) (E-B4, E-C4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 วงจรการวัดทดลอง

รูปที่ 4.2 แสดงวงจรการทดลองของแมกนีโททรานซิสเตอร์ รูปที่ 4.2(ก) แสดงการวัดแบบตัวเดียว (Single mode) และรูปที่ 4.2(ข) แสดงการวัดแบบรวม (Merge mode) ขั้วอิมิตเตอร์ต่อกับกระแสไฟฟ้าคงที่ (constant current) ขั้วเบสและคอลเลคเตอร์ต่อตัวต้านทานที่สามารถปรับค่าแรงดันออฟเซตได้ การวัดแบบตัวเดียวแสดงการวัดในแต่ละด้านเอาท์พุทของคู่เบสและคอลเลคเตอร์ การทดลองแบบรวมทดลองเช่นเดียวกับแบบเดี่ยวแต่ขั้วที่ไม่ได้วัดทำการต่อตัวต้านทานทุกขั้ว ทำการไบอัสกระแสอิมิตเตอร์ที่ค่าต่างๆในการวัดแบบตัวเดียวและรวมตามลำดับ จากนั้นทำการวัดกระแสเอาท์พุทที่กระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสเพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงในสภาวะปกติและสภาวะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทาง B_x , B_y และ B_z รูปที่ 4.2(ข) แสดงวงจรการทดลองแบบรวม (Merge mode) โดยนำขั้วคอลเลคเตอร์ทั้งสี่เชื่อมต่อกับตัวต้านทานเช่นเดียวกับขั้วเบส ทำการทดลองเช่นเดียวกับตัวเดียวเพื่อเปรียบเทียบกระแสเอาท์พุทคอลเลคเตอร์และกระแสเบสของอุปกรณ์



รูปที่ 4.2 วงจรการทดลองของแมกนีโททรานซิสเตอร์ (ก) การทดลองแบบตัวเดียว (Single mode) และ (ข) การทดลองแบบรวม (Merge mode)

4.3 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบตัวเดียว (Single Mode)

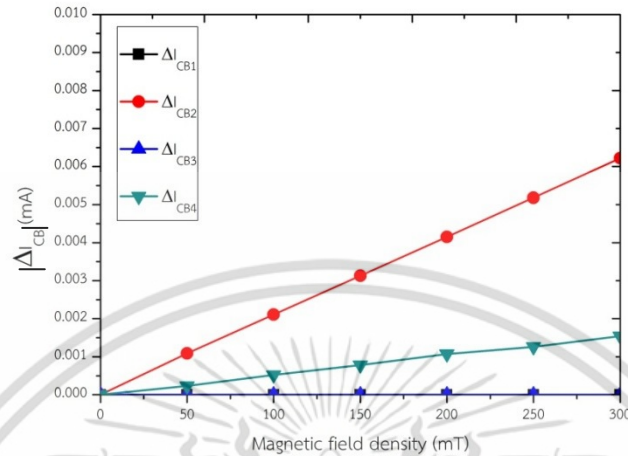
4.3.1 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x ที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าต่างๆ

รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กในทิศทาง B_x ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-300 mT ทำการไบอัสที่กระแสอิมิตเตอร์ 1mA และวัดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB}) ในแต่ละขั้วของแมกนีโททรานซิสเตอร์ ตัวต้านทานและการต่อกราวด์ของขั้วเบสและคอลเลคเตอร์ทำการต่อเฉพาะขั้วที่ทำการวัดผล โดยที่ขั้วอื่นๆที่ไม่ได้ทำการวัดจะไม่ได้ต่อกับตัวต้านทานอื่นๆ จากรูปที่ 4.3 ในขั้วการวัดทั้งสี่ได้ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

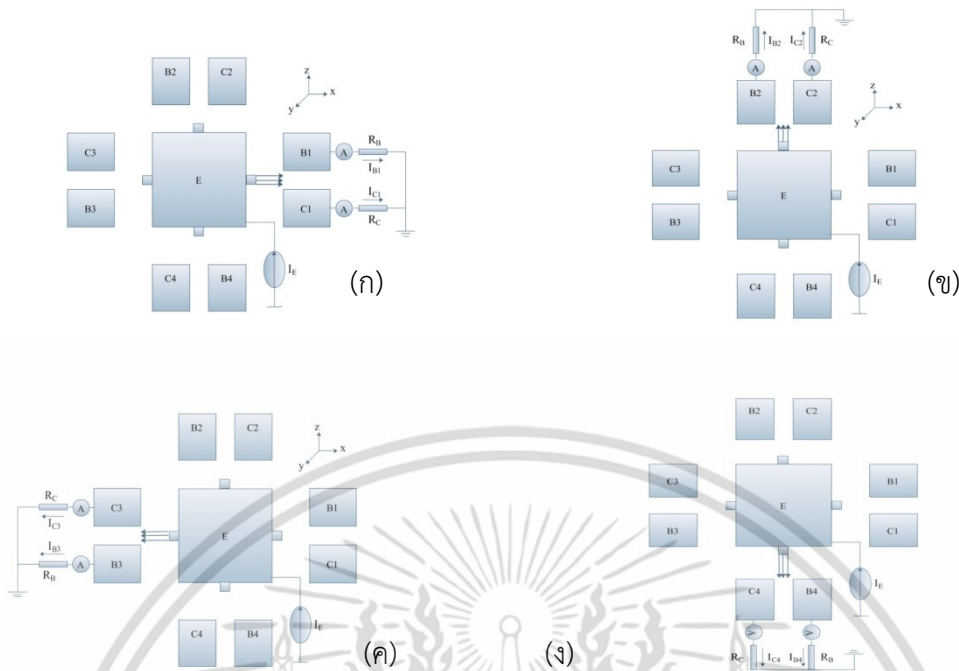
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นสนามแม่เหล็กที่ขั้ว E-B2-C2 และ E-B4-C4 แสดงเป็นค่ากระแสเอาต์พุต ΔI_{CB2} และ ΔI_{CB4} ตามลำดับ ส่วนการทดลองที่ขั้วการวัด E-B1-C1 และ E-B3-C3 กระแสเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าขั้วอื่นๆแสดงค่ากระแสเอาต์พุต ΔI_{CB1} และ ΔI_{CB3}



รูปที่ 4.3 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x ในการวัดแบบตัวเดียว (Single mode) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA

จากผลการทดลองรูปที่ 4.3 แสดงผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์และทดลองเปรียบเทียบค่าเอาต์พุตที่ขั้วใช้งานต่างๆ ในการทดลองแบบตัวเดียว (Single mode) ภาวะปกติไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านแมกนีโตทรานซิสเตอร์ได้รับการไบอัสไปข้างหน้า (Forward Bias) ขั้วอิมิตเตอร์ที่มีพาหะส่วนมากคือโฮลเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ผ่านเบสไปขั้วคอลเลคเตอร์ C และขั้วเบส B โดยการทดลองแบบตัวเดียวนั้นการต่อตัวต้านทานสำหรับการวัดกระแสเอาต์พุตเฉพาะขั้วที่ต้องการวัดส่วนขั้วอื่นๆไม่ได้รับการต่อกับตัวต้านทาน รูปที่ 4.4(ก) แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านที่ขั้ว E-B1-C1 ในทิศทาง x รูปที่ 4.4(ข) แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านที่ขั้ว E-B2-C2 ในทิศทาง -y รูปที่ 4.4(ค) แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านที่ขั้ว E-B3-C3 ในทิศทาง -x และรูปที่ 4.4(ง) การเคลื่อนที่ของพาหะขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านที่ขั้ว E-B4-C4 ในทิศทาง y ขั้วคอลเลคเตอร์ C และ ขั้วเบส B ได้รับปริมาณพาหะเท่าๆกัน ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ I_C และกระแสเบส I_B เท่ากัน ไม่เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ และกระแสเบสทั้งสอง ($\Delta I_{CB} = 0$) กระแสเอาต์พุตของแมกนีโตทรานซิสเตอร์มีความเท่ากันที่ขั้วใช้งานต่างๆ เนื่องการออกแบบที่สมมาตรของอุปกรณ์ แรงดันออฟเซตสามารถปรับเป็นศูนย์ได้ด้วยค่าความต้านทาน R_B และ R_C

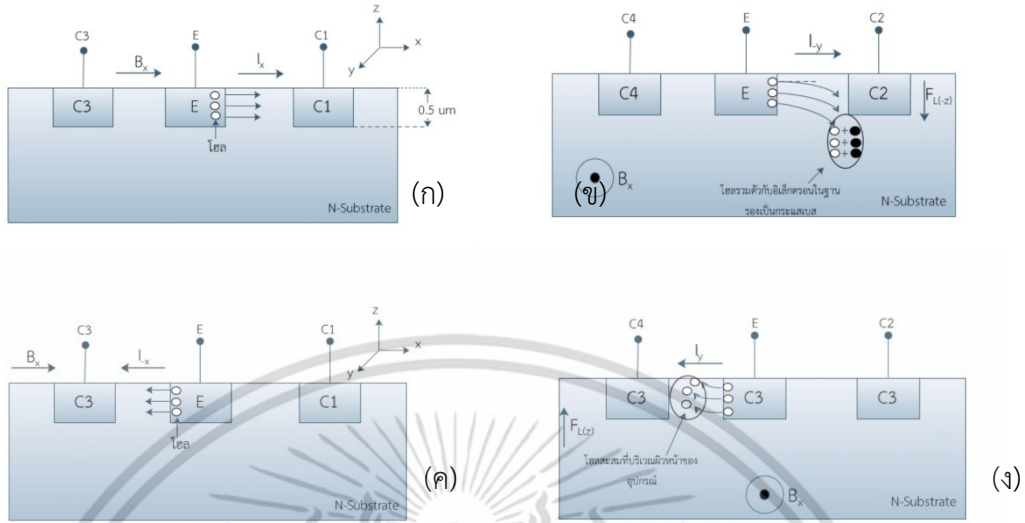


รูปที่ 4.4 ทิศทางการเคลื่อนที่ของโฮลขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน (ก) E-B1-C1, (ข) E-B2-C2 (ค) E-B3-C23 และ (ง) E-B4-C4

รูปที่ 4.5 แสดงปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนพาหะ (carrier deflection) สามารถวิเคราะห์ได้จากพฤติกรรมของโฮล (hole) ซึ่งเป็นพาหะส่วนมากในอิมิตเตอร์ ในการวัดแบบตัวเดียวพาหะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้าที่ขั้วใช้งานต่างๆของแมกนีไทรอนซิสเตอร์ รูปที่ 4.5(ก) ที่ขั้วใช้งาน E-B1-C1 พาหะเคลื่อนที่ทิศทาง x ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_x แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทาง B_x ทิศทางของสนามแม่เหล็กกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าเป็นทิศทางเดียวกันไม่เกิดการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะ โดยกระแสเบส B1 เท่ากับกระแสคอลเลคเตอร์ C1 ไม่เกิดความแตกต่างของกระแสทั้งสอง ($\Delta I_{CB} = 0$) รูปที่ 4.5(ข) ที่ขั้วใช้งาน E-B2-C2 พาหะเคลื่อนที่ในทิศทาง $-y$ ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_y มีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก B_x ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง $-z$ กระทำกับพาหะทำให้พาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์ พาหะโฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในฐานรองรับตัวกับอิล็กตรอนที่เป็นพาหะส่วนมากในฐานรองรับ ผลให้กระแสเบสสูงขึ้นตรงข้ามกับกระแสคอลเลคเตอร์ที่ลดลง เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ ($\Delta I_{CB} \neq 0$) รูปที่ 4.5(ค) ที่ขั้วใช้งาน E-B3-C3 พาหะเคลื่อนที่ในทิศทาง $-x$ ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_x การตัดผ่านของสนามแม่เหล็กให้ผลเช่นเดียวกับขั้วใช้งาน E-B1-C1 นั่นคือไม่เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากทิศทางของกระแสไฟฟ้าเป็นทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็ก รูปที่ 4.5(ง) ที่ขั้วใช้งาน E-B4-C4 พาหะเคลื่อนที่ในทิศทาง y ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_y สนามแม่เหล็กทิศทาง B_x ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง z กระทำกับพาหะทำให้

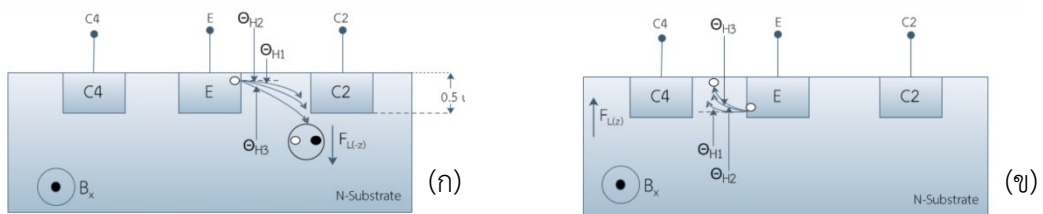
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่เปียงเบนไปสะสมบริเวณผิวหน้าของอุปกรณ์เป็นผลให้กระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ไม่เท่ากันเกิดความแตกต่างของกระแสทั้งสอง ($\Delta I_{CB} \neq 0$)



รูปที่ 4.5 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะ (โฮล) ขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน (ก) E-B1-C1 (ข) E-B2-C2 (ค) E-B3-C23 และ (ง) E-B4-C4

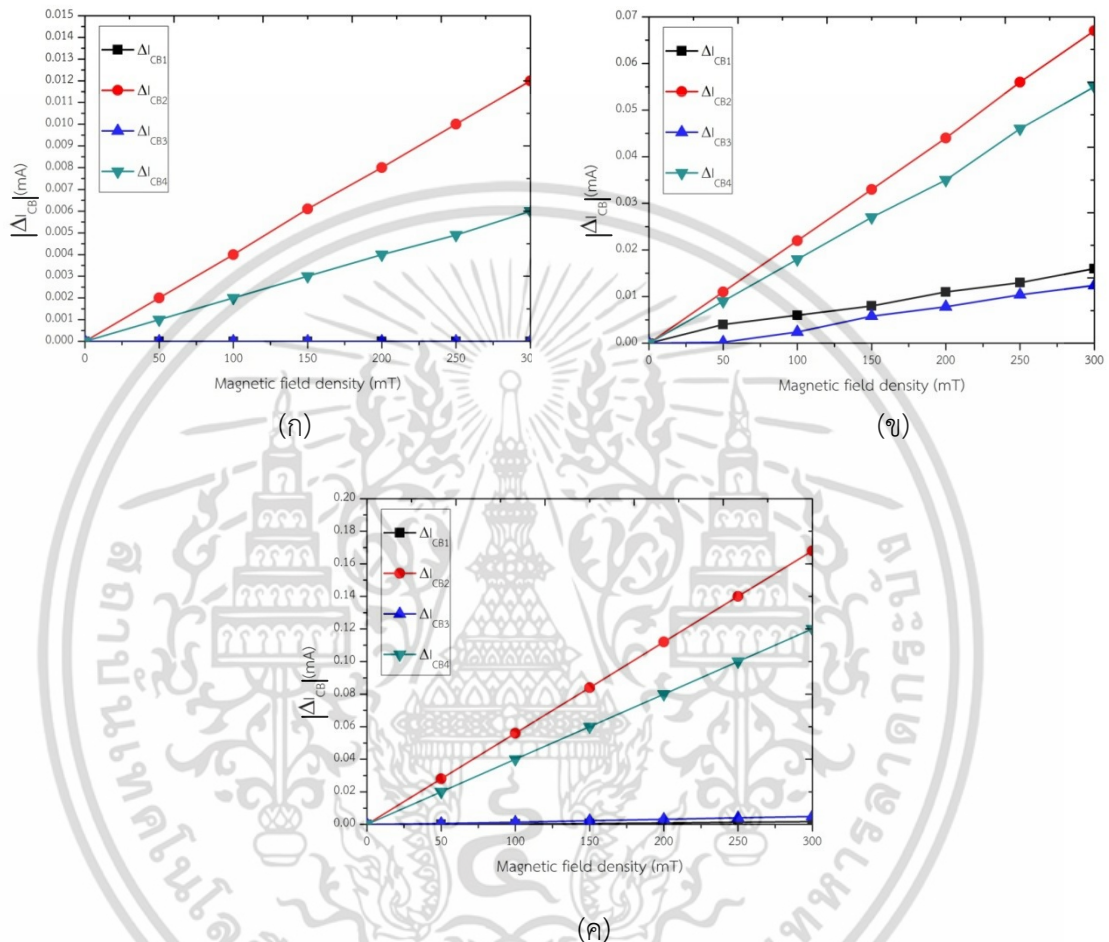
การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 100 ถึง 300 mT จากผลการทดลองรูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ในแต่ละพารามิเตอร์มีความชันเพิ่มขึ้น แสดงถึงค่าความแตกต่างของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ (I_{CB}) ที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กแรงลอเรนซ์มีแรงกระทำกับพาหะมากขึ้นตามสมการที่ (2.2) $|F_L| = F_L = e v_{DX} B_Z$ พาหะถูกแรงกระทำจากแรงลอเรนซ์มากขึ้นทำให้พาหะเคลื่อนที่เปียงเบนในมุมที่กว้างขึ้นตามสมการ $\tan \theta_H = \mu_p B_Z$ ที่ขั้ว E-B2-C2 พาหะ (โฮล) เคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปที่ขั้ว คอลเลคเตอร์ มีการเปียงเบนในมุมที่กว้างขึ้นและไป สะสมในฐานรองเกิดการรวมตัวใหม่กลายเป็นกระแสเบสที่สูงขึ้น ดังแสดงรูปที่ 4.6(ก) จึงทำให้กระแสเบส I_B เพิ่มขึ้นตรงข้ามกับกระแสคอลเลคเตอร์ I_C ที่ลดลง สำหรับที่ขั้ว E-B4-C4 พาหะโฮลเคลื่อนที่เปียงเบนสะสมในทางตรงกันข้าม คือสะสมที่บริเวณผิวหน้าของอุปกรณ์เป็นผลให้ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์มีค่าสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.6(ข)



รูปที่ 4.6 พาหะ(โฮล)เคลื่อนที่เปียงเบนในมุมที่กว้างขึ้นตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (ก) E-B2-C2และ (ข) E-B4-C4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กในทิศทาง B_x ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-300 mT ทำการไบอัสที่กระแสลิมิตเตอร์ 5, 10 และ 40 mA และวัดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB}) ในแต่ละขั้วของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 4.3.1



รูปที่ 4.7 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x ในการวัดแบบตัวเดียว (Single mode) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสลิมิตเตอร์ (ก) 5 mA, (ข) 10mA และ (ค) 40mA

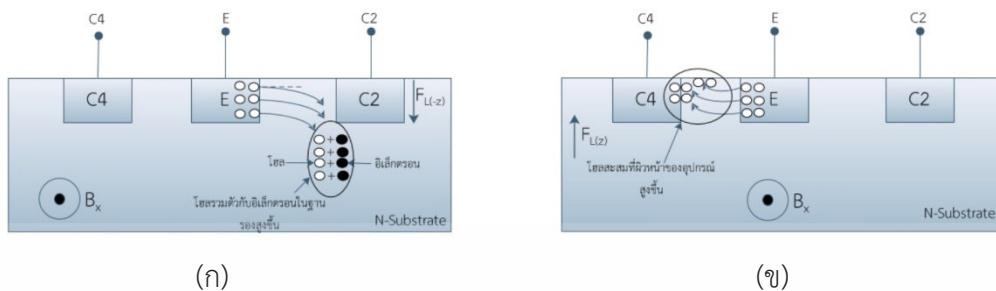
จากการทดลองรูปที่ 4.7(ก)-(ค) แสดงผลการทดลองเมื่อทำการเพิ่มค่ากระแสการทำงานลิมิตเตอร์จาก 5 mA เป็น 10 mA และ 40 mA กราฟความสัมพันธ์ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์มีความชันเพิ่มขึ้นนั่นคือค่าความแตกต่างของกระแส เอพท์พุทที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานลิมิตเตอร์ การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานลิมิตเตอร์เป็นการเพิ่มปริมาณการฉีดพาหะโฮลจากอิมิตเตอร์ไปคอลเลคเตอร์ และเบสมากขึ้น ปริมาณโฮลที่รวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสมากขึ้นทำให้ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์มากขึ้นตามสมการ

$$\Delta I_{CB} = J_{PY} \cdot W_E \cdot L \cdot \tan \theta_H$$

โดยที่กระแสการทำงาน 40 mA มีค่าเอพท์พุทที่วัดได้มีค่าสูงและมีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเชิงเส้นที่ดี สามารถวิเคราะห์การทำงานเมื่อทำการเพิ่มค่ากระแสการทำงานอิมิตเตอร์ดังแสดงรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การเพิ่มปริมาณการฉีดพาหะ(โฮล)เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสอิมิตเตอร์
(ก) E-B2-C2 และ (ข) E-B4-C4

4.3.2 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ทิศทาง B_x ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ $I_E = 1, 5, 10$ และ 40 mA ทำการเปรียบเทียบค่าความไวที่ขั้วใช้งานระหว่าง E-B2-C2 และ E-B4-C4 ซึ่งสามารถคำนวณค่าความไวตามสมการ $S_R = \frac{\Delta I_{CB}}{I_E \cdot \Delta B_Z} \times 100$ โดยจากตารางเปรียบเทียบค่าความไวที่ กระแสอิมิตเตอร์ 10mA สามารถทำให้ค่าความไวสูงขึ้นคือ 2.23 และ 1.83 %/T ที่ขั้ว E-B2-C2 และ E-B4-C4 ตามลำดับ

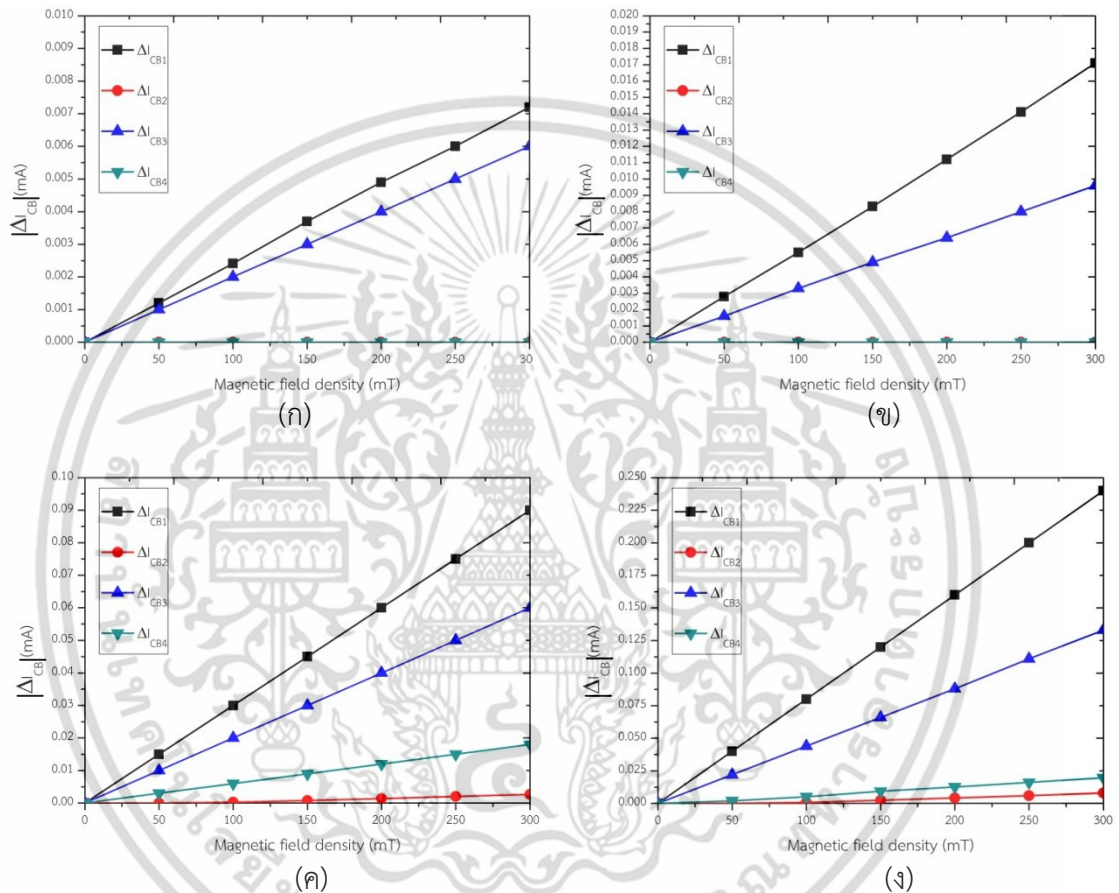
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x

กระแสอิมิตเตอร์ (mA)	ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก %/T			
	ขั้วของแมกนีโตทรานซิสเตอร์			
	E-B1-C1	E-B2-C2	E-B3-C3	E-B4-C4
1	-	2.07	-	0.51
5	-	0.8	-	0.4
10	-	2.23	-	1.83
40	-	1.4	-	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y ที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าต่างๆ

รูปที่ 4.9(ก)-(ง) แสดงผลการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กในทิศทาง B_y ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-300 mT ทำการไบอัสที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ 1, 5, 10 และ 40mA และวัดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB}) ในแต่ละขั้วของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 4.3.1

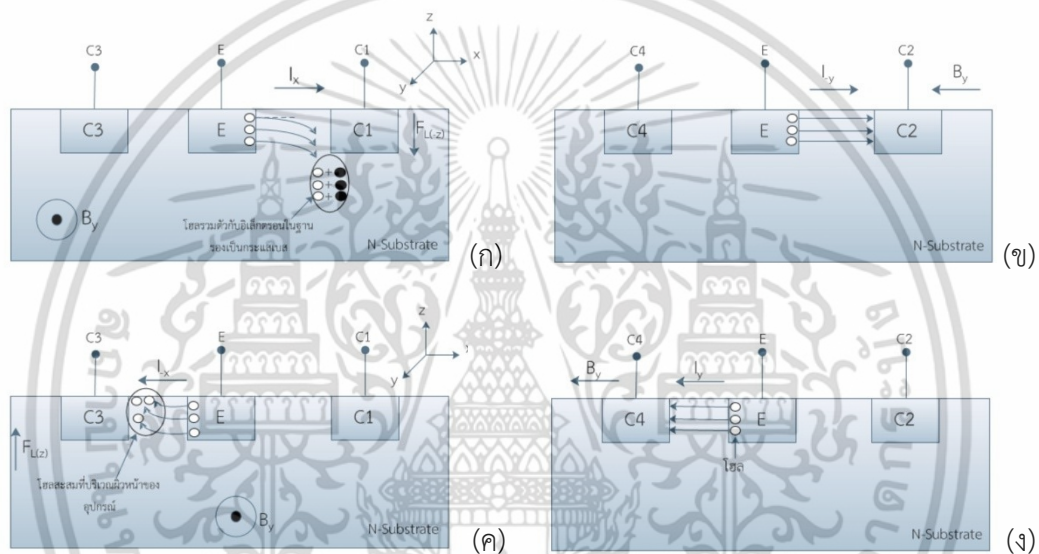


รูปที่ 4.9 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y ในการวัดแบบตัวเดียว (Single mode) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าต่างๆ (ก) 1mA, (ข) 5 mA, (ค) 10mA และ (ง) 40mA

รูปที่ 4.10 แสดงปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนพาหะ (carrier deflection) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y สามารถวิเคราะห์ได้จากพฤติกรรมของโฮล (hole) ซึ่งเป็นพาหะส่วนมากในอิมิตเตอร์ ในการวัดแบบตัวเดียวพาหะ เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้าที่ขั้วใช้งานต่างๆของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ รูปที่ 4.10(ก) ที่ขั้วใช้งาน E-B1-C1 พาหะเคลื่อนที่ทิศทาง x ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_x มีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในทิศทาง $-z$ เป็นผลให้เกิดการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง

กระแสเบส B1 และกระแสคอลเลคเตอร์ C1 ($\Delta I_{CB} \neq 0$) รูปที่ 4.10(ข) ที่ขั้วใช้งาน E-B2-C2 พาหะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ในทิศทาง $-y$ ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_y มีทิศทางขนานกับสนามแม่เหล็ก B_y นั่นคือไม่เกิดการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะ กระแสเบส B2 และกระแสคอลเลคเตอร์ C2 มีค่าเท่ากัน ($\Delta I_{CB} = 0$) รูปที่ 4.10(ค) ที่ขั้วใช้งาน E-B3-C3 พาหะเคลื่อนที่ในทิศทาง $-x$ ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_x การตัดผ่านของสนามแม่เหล็กให้ผลเช่นเดียวกับขั้วใช้งาน E-B1-C1 นั่นคือเกิดการเบี่ยงเบนของพาหะสะสมบริเวณผิวหน้าของอุปกรณ์เนื่องจากแรงลอเรนซ์ทิศทาง z ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบส B3 และกระแสคอลเลคเตอร์ C3 ($\Delta I_{CB} \neq 0$) รูปที่ 4.10(ง) ที่ขั้วใช้งาน E-B4-C4 พาหะเคลื่อนที่ในทิศทาง y ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_y ขนานกับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y ไม่เกิดการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะ กระแสเบส B4 และกระแสคอลเลคเตอร์ C4 มีค่าเท่ากัน ($\Delta I_{CB} = 0$)



รูปที่ 4.10 การเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะ (โฮล) ในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y
(ก) E-B1-C1, (ข) E-B2-C2 (ค) E-B3-C23 และ (ง) E-B4-C4

4.3.4 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Sensitivity) ทิศทาง B_y ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ $I_E = 1, 5, 10$ และ 40mA โดยเปรียบเทียบที่ขั้วใช้งานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ จากผลการทดลองรูปที่ 4.9 การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์สามารถทำให้ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นได้ เช่นเดียวกับการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x โดยที่กระแสอิมิตเตอร์ 10mA สามารถทำให้ค่าความไวสูงขึ้นคือ 3 และ 2 %/T ที่ขั้ว E-B1-C1 และ E-B3-C3 ตามลำดับ

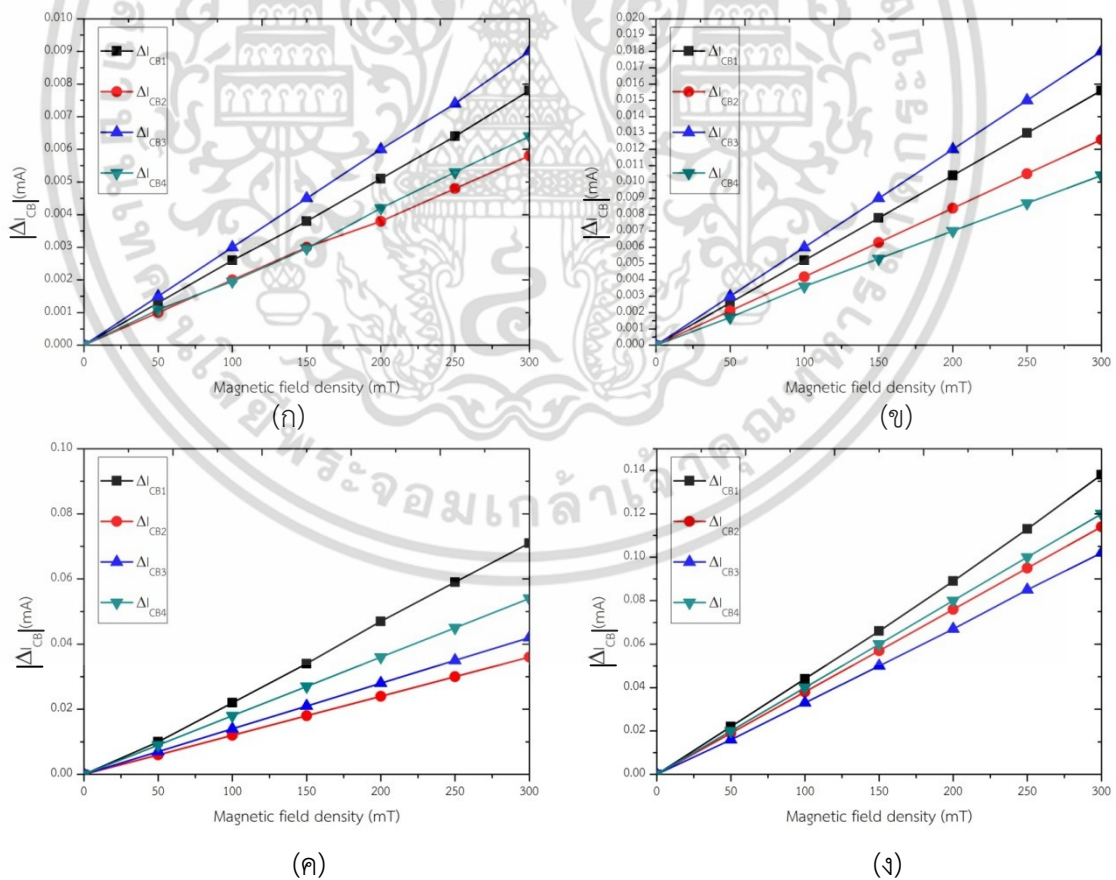
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z

กระแสลิมิตเตอร์ (mA)	ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก %/T			
	ขั้วของแมกนีโตทรานซิสเตอร์			
	E-B1-C1	E-B2-C2	E-B3-C3	E-B4-C4
1	2.4	-	2	-
5	1.14	-	0.64	-
10	3	-	2	-
40	2	-	1.10	-

4.3.5 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z ที่กระแสลิมิตเตอร์ค่าต่างๆ

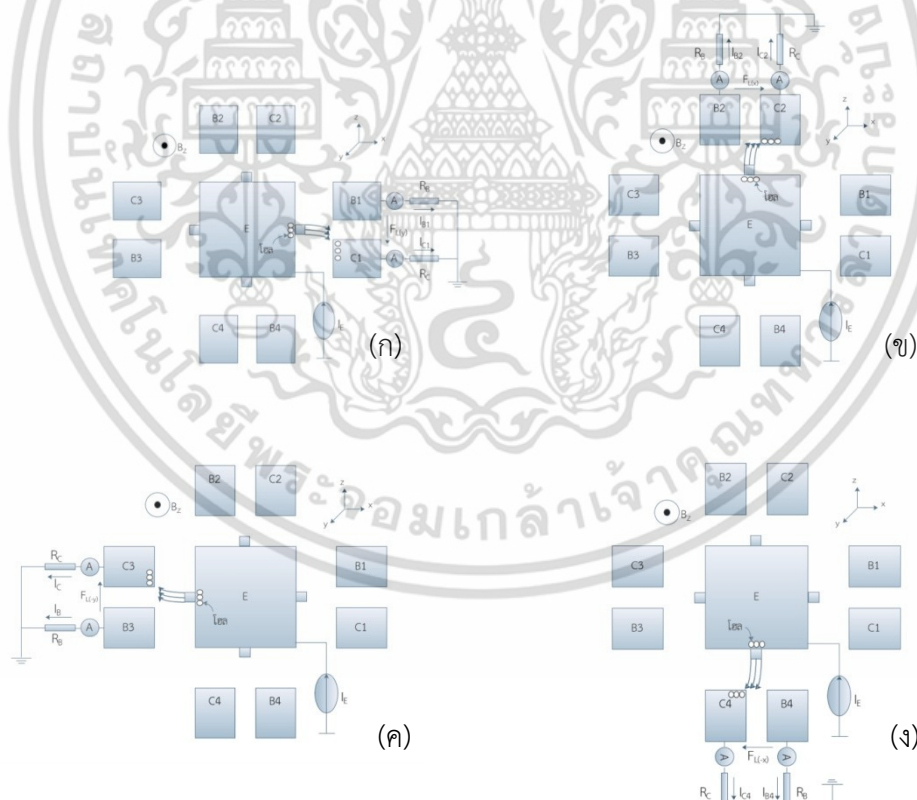
รูปที่ 4.11(ก)-(ง) แสดงผลการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กในทิศทาง B_z ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-300mT ทำการไปอัสที่กระแสลิมิตเตอร์ 1, 5, 10 และ 40 mA และวัดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB}) ในแต่ละขั้วของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 4.3.1 และ 4.3.3



รูปที่ 4.11 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z ในการวัดแบบตัวเดียว (Single mode) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสลิมิตเตอร์ (ก) 1 mA, (ข) 5mA, (ค) 10mA และ (ง) 40mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.12 แสดงปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนพาหะ (carrier deflection) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z ซึ่งการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะมีตอบสนองในทุกๆ ชั่วโมง โดยรูปที่ 4.12(ก) ที่ชั่วโมงใช้งาน E-B1-C1 พาหะเคลื่อนที่ทิศทาง x ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_{B1} และ I_{C1} มีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในทิศทาง y เป็นผลให้เกิดการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบส B1 และกระแสคอลเลคเตอร์ C1 ($\Delta I_{CB} \neq 0$) รูปที่ 4.12(ข) ที่ชั่วโมงใช้งาน E-B2-C2 พาหะเคลื่อนที่ในทิศทาง $-y$ ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_{B2} และ I_{C2} มีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก B_z ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในทิศทาง x เป็นผลให้ $\Delta I_{CB} \neq 0$ รูปที่ 4.12(ค) ที่ชั่วโมงใช้งาน E-B3-C3 พาหะเคลื่อนที่ในทิศทาง $-x$ ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_{C3} และ I_{B3} การตัดผ่านของสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากทิศทาง B_z ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในทิศทาง $-y$ เป็นผลให้ $\Delta I_{CB} \neq 0$ เช่นเดียวกัน รูปที่ 4.12(ง) ที่ชั่วโมงใช้งาน E-B4-C4 พาหะเคลื่อนที่ในทิศทาง y ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_{B4} และ I_{C4} ทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในทิศทาง $-x$ เป็นผลให้เกิดการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบส B4 และกระแสคอลเลคเตอร์ C4 ($\Delta I_{CB} \neq 0$)



รูปที่ 4.12 การเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะ (โฮล) ในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z

(ก) E-B1-C1, (ข) E-B2-C2 (ค) E-B3-C23 และ (ง) E-B4-C4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ทิศทาง B_z ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ $I_E = 1, 5, 10$ และ 40 mA โดยเปรียบเทียบที่ขั้วใช้งานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ โดยที่ กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA สามารถทำให้ค่าความไว สูงขึ้นในทุกๆขั้วใช้งานคือ $2.6, 1.93, 3$ และ 2.13 %/T ที่ขั้ว E-B1-C1, E-B2-C2, E-B3-C4, E-B4-C4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z

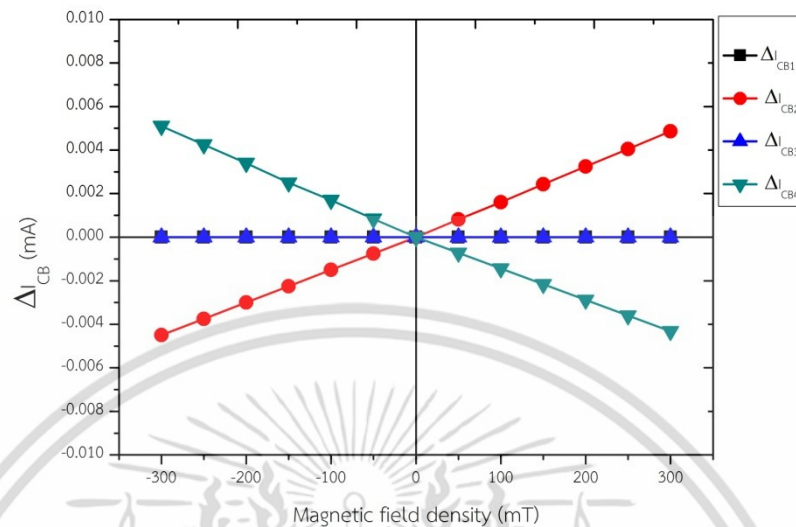
กระแสอิมิตเตอร์ (mA)	ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก %/T			
	ขั้วของแมกนีโตทรานซิสเตอร์			
	E-B1-C1	E-B2-C2	E-B3-C3	E-B4-C4
1	2.6	1.93	3	2.13
5	1.04	0.84	1.2	0.69
10	2.36	1.2	1.4	1.8
40	1.15	0.95	0.85	1

4.4 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบรวม (Merge Mode)

4.4.1 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x และ B_x ที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าต่างๆ

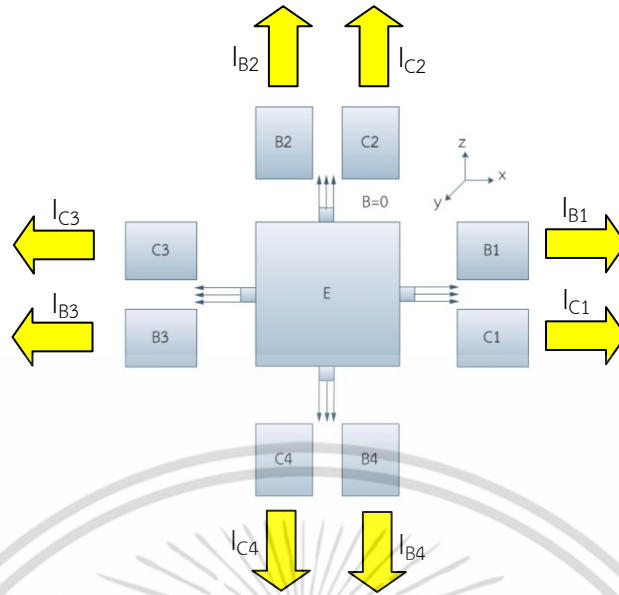
รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กในทิศทาง B_x ของการทดลองแบบรวม(Merge Mode) ในการทดลองนี้ทุกขั้วใช้งานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทำการต่อตัวต้านทานทุกขั้วใช้งานเพื่อสำหรับการทำงานพร้อมกัน เพราะฉะนั้นขั้วอิมิตเตอร์ถูกไบอัสไปข้างหน้าพาหะส่วนใหญ่ในอิมิตเตอร์(โฮล)มีการเคลื่อนที่ในทิศทางเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในทิศทางเช่นเดียวกัน การทดลองเช่นเดียวกับแบบตัวเดียวคือเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ $0-300$ mT ทำการไบอัสที่กระแสอิมิตเตอร์ $5, 10$ และ 40 mAและวัดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB}) ในแต่ละขั้วของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทานและการต่อกราวด์ของขั้วเบสและคอลเลคเตอร์ทุกขั้วใช้งานเป็นผลให้ผลรวมของกระแสเบสแลกระแสคอลเลคเตอร์ในแต่ละขั้วใช้งานมีค่าหนึ่งส่วนสี่ของกระแสไบอัสอิมิตเตอร์ รูปที่ 4.13 แสดงผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กที่กระแสไบอัสอิมิตเตอร์ 5 mA โดยในขั้วการวัดทั้งสี่ได้ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์เช่นเดียวกับการวัดแบบตัวเดียว คือมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กซึ่งกระแสเอาท์พุท ΔI_{CB2} ในการวัดที่ขั้ว B2 และ C2 เช่นเดียวกับกระแสเอาท์พุท เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ΔI_{CB2} ในการวัดที่ขั้ว B4 และ C4 ส่วนการวัดกระแสเอาต์พุต ΔI_{CB1} และ ΔI_{CB1} ที่ขั้วการวัด B1-C1 และ B3-C3 กระแสเอาต์พุตไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก



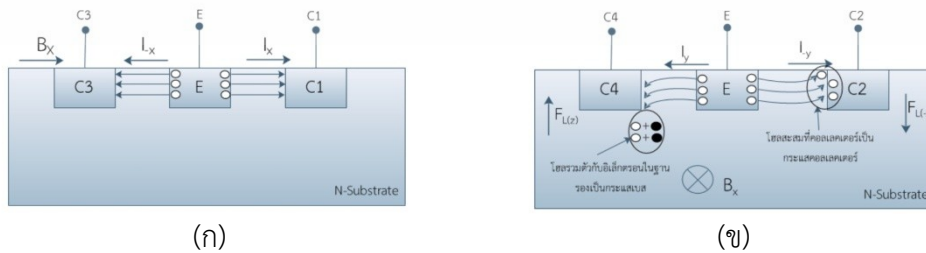
รูปที่ 4.13 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x ในการวัดแบบรวม (Merge mode) ของ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสอิมิตเตอร์ 5 mA

จากผลการทดลองรูปที่ 4.13 แสดงผลการตอบสนองสนามแม่เหล็ก ทิศทาง B_x และ B_x ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในการทำงานแบบรวม (Merge mode) และทดลองเปรียบเทียบค่าเอาต์พุตที่ ขั้วใช้งาน ต่างๆ ในภาวะปกติไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านแมกนีโตทรานซิสเตอร์ได้รับการไบอัส ไปข้างหน้า (Forward Bias) ที่ขั้วอิมิตเตอร์ พาหะส่วนมาก (โฮล) เคลื่อนที่ในทิศทางจากอิมิตเตอร์ผ่านเบสไปที่ ขั้วคอลเลคเตอร์ C และขั้วเบส B ดังแสดงรูปที่ 4.13 โดยกระแสอิมิตเตอร์ถูกแบ่งเป็นส่วนตามการ เคลื่อนที่ของพาหะ ขั้วคอลเลคเตอร์ C และ ขั้วเบส B ได้รับปริมาณพาหะเท่าๆกัน ทำให้กระแส คอลเลคเตอร์ I_C และกระแสเบส I_B เท่ากัน ไม่เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ และ กระแสเบสทั้งสอง ($\Delta I_{CB} = 0$) กระแสเอาต์พุตของแมกนีโตทรานซิสเตอร์มีความเท่ากันในทิศทาง เนื่องจากการออกแบบที่สมมาตรของอุปกรณ์ รูปที่ 4.15 แสดงปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนพาหะ (carrier deflection) สามารถวิเคราะห์ได้จากพฤติกรรมของโฮล (hole) ซึ่งเป็นพาหะส่วนมากใน อิมิตเตอร์โดยภาวะปกติเคลื่อนที่ใน สี่ทิศทางคือ x, -x, y และ -y จากอิมิตเตอร์ไปขั้วคอลเลคเตอร์ และขั้วเบสทั้งสองด้าน เมื่อมีสนามแม่เหล็กแนวตัดผ่าน ในทิศทาง B_x ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง z และ -z โดยแรงลอเรนซ์นี้กระทำกับโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปยังทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์ ในการทดลองแบบรวมการตอบสนองสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นพร้อมๆกันในทุกขั้วใช้งาน



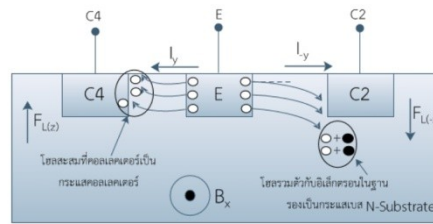
รูปที่ 4.14 ทิศทางการเคลื่อนที่ของโพลขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

แรงลอเรนซ์ทิศทาง $-z$ กระทบกับพาหะที่เคลื่อนที่ในทิศทาง $-y$ ที่ขั้ว E-B2-C2 ทำให้พาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปในฐานรอง เป็นผลให้พาหะโพลเกิดการรวมตัวกับพาหะส่วนมากในฐานรอง (อิเล็กตรอน) ทำให้กระแสเบสมีค่าสูงขึ้นมากกว่ากระแสคอลเลคเตอร์ เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ $\Delta I_{CB} \neq 0$ เช่นเดียวกับพาหะที่เคลื่อนที่ในทิศทาง y ที่ขั้ว E-B4-C4 สนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าเกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง z พาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนสะสมบริเวณผิวหน้าของอุปกรณ์เป็นผลให้ความแตกต่างของกระแสที่ขั้ว B4 และ C4 เกิดการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 4.15(ข) ในกรณีนี้ขั้ว E-B1-C1 และ E-B3-C3 ทิศทางของกระแสมีทิศทางเดียวกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก กระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเท่ากันไม่ตอบสนองสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.15(ก) รูปที่ 4.16 การตัดผ่านสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x แสดงการตอบสนองที่ขั้ว E-B2-C2 และ E-B4-C4 โดยมีการเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้าม ที่ขั้วใช้งาน E-B2-C2 พาหะเคลื่อนที่ทิศทาง $-y$ เป็นผลให้เกิดการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปที่ผิวหน้าของอุปกรณ์ ซึ่งตรงข้ามกับที่ขั้วใช้งาน E-B4-C4 ที่พาหะเคลื่อนที่ทิศทาง y พาหะเกิดการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปที่ฐานรอง



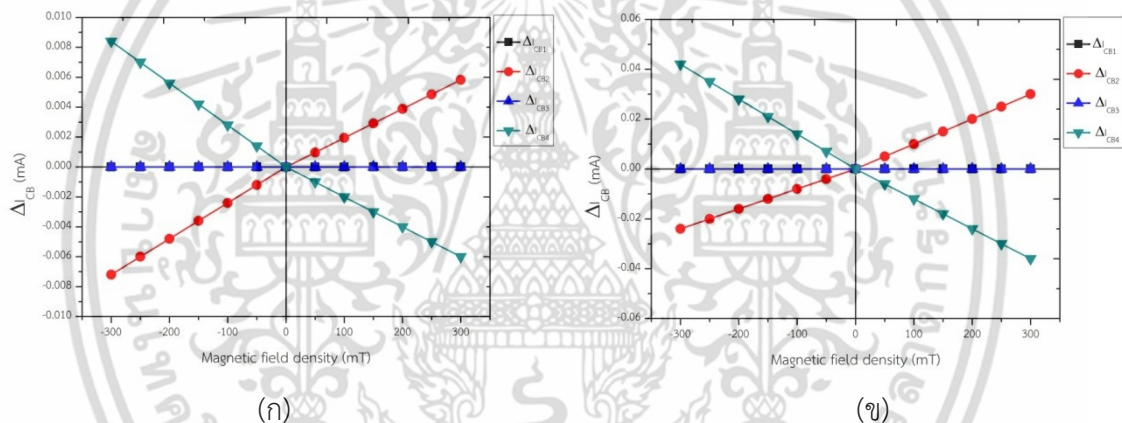
รูปที่ 4.15 การเคลื่อนที่ของพาหะในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x (ก) สนามแม่เหล็กทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า (ข) สนามแม่เหล็กทิศทาง B_x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 การเคลื่อนที่ของพาหะในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x

รูปที่ 4.17(ก)-(ข) แสดงผลการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กในทิศทาง B_x และ B_x แบบรวม (Merge mode) ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-300 mT ทำการไบอัสที่กระแสลิมิตเตอร์ 10 และ 40mA ทำการวัดความแตกต่างระหว่างกระแสกับกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB}) ในแต่ละขั้วของแมกนีโททรานซิสเตอร์ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองแบบเดี่ยว



รูปที่ 4.17 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x และ B_x ในการวัดแบบรวม (Merge mode) ของแมกนีโททรานซิสเตอร์ที่กระแสลิมิตเตอร์ค่าต่างๆ (ก) 10 mA และ (ข) 40 mA

4.4.2 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x และ B_x

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ทิศทาง B_x และ B_x ของแมกนีโททรานซิสเตอร์ที่กระแสการทำงานลิมิตเตอร์ $I_E = 5\text{mA}, 10\text{mA}$ และ 40mA โดยที่กระแสลิมิตเตอร์ 40mA สามารถทำให้ค่าความไวสูงในทุกๆขั้วใช้งานคือ 1 และ 0.8 %/T ที่ขั้ว E-B2-C2 ในทิศทาง B_x และ B_x ตามลำดับ ที่ขั้วใช้งาน E-B4-C4 มีค่าความไว 1.2 และ 1.4 %/T เช่นเดียวกัน ที่กระแสไบอัสลิมิตเตอร์ 10mA มีค่าความไวที่น้อยในช่วง 0.9-1.2 %/T การกลับทิศทางของสนามแม่เหล็กไม่มีผลต่อค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก แต่จะมีผลของการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างกระแสเอาท์พุทเพียงอย่างเดียว

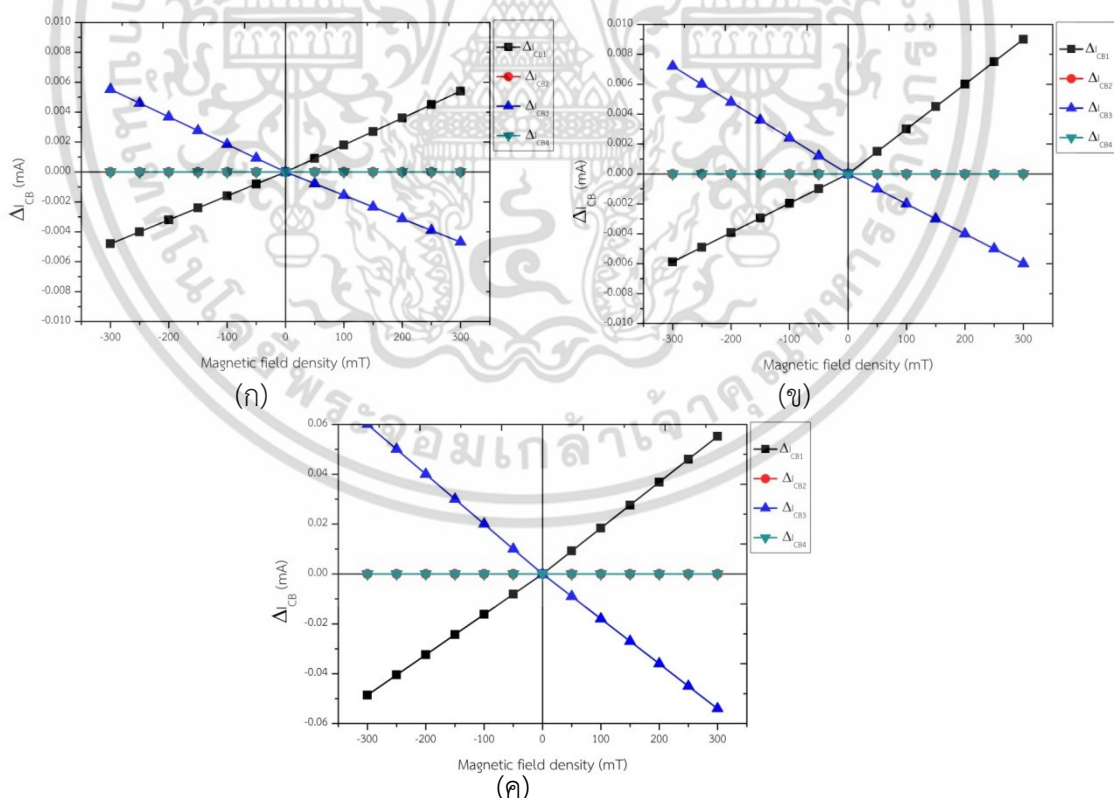
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x และ B_x

กระแสอิมิตเตอร์ (mA)	ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก %/T (S_x, S_x)			
	ขั้วของแมกนีโตทรานซิสเตอร์			
	E-B1-C1	E-B2-C2	E-B3-C3	E-B4-C4
5	-	1.31, 1.21	-	1.16, 1.37
10	-	0.77, 0.96	-	0.8, 1.12
40	-	1, 0.8	-	1.2, 1.4

4.4.3 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y และ B_y ที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าต่างๆ

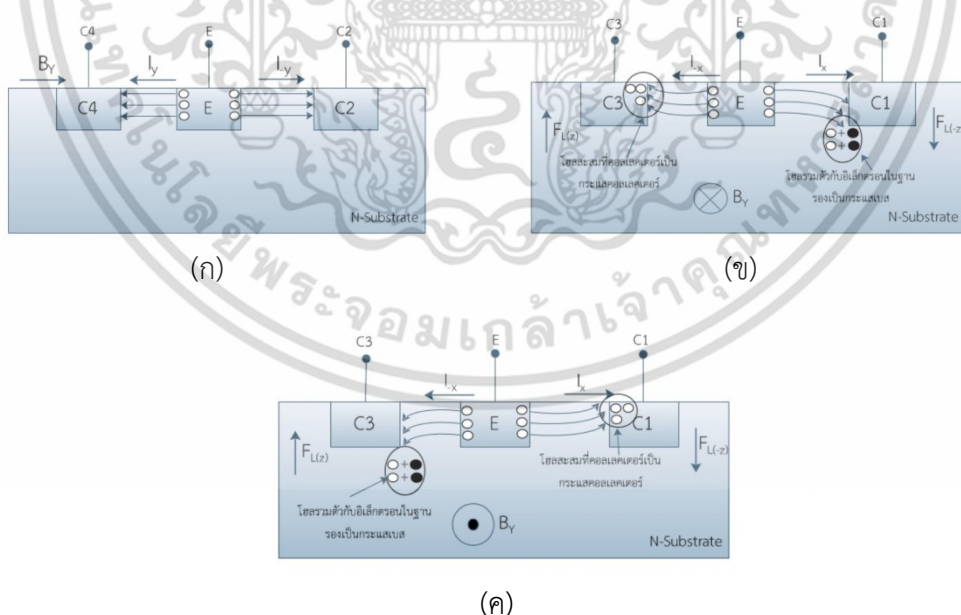
รูปที่ 4.18 แสดงผลการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กในทิศทาง B_y และ B_y ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-300 mT ทำการไบอัสที่กระแสอิมิตเตอร์ 5, 10 และ 40 mA และวัดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB}) ในแต่ละขั้วของแมกนีโตทรานซิสเตอร์



รูปที่ 4.18 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y และ B_y ในการวัดแบบรวม (Merge mode) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสอิมิตเตอร์ (ก) 5 mA, (ข) 10mA และ (ค) 40mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.19 แสดงปรากฏการณ์การเคลื่อนที่เบี่ยงเบนพาหะ (carrier deflection) โดยภาวะปกติเคลื่อนที่ในทิศทางคือ x , $-x$, y และ $-y$ จากอิมิตเตอร์ไปขั้วคอลเลคเตอร์และขั้วเบสทั้งสี่ด้าน สนามแม่เหล็กแนวตัดผ่านในทิศทาง B_x ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง z และ $-z$ โดยแรงลอเรนซ์นี้กระทำกับโฮล ในการทดลองแบบรวมการตอบสนองสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นพร้อมๆกันในทุกขั้วใช้งาน แรงลอเรนซ์ทิศทาง $-z$ กระทำกับพาหะที่เคลื่อนที่ในทิศทาง x ที่ขั้ว E-B1-C1 ทำให้พาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปในฐานรอง เป็นผลให้พาหะโฮลเกิดการรวมตัวกับพาหะส่วนมากในฐานรอง (อิเล็กตรอน) ทำให้กระแสเบสมีค่าสูงขึ้นมากกว่ากระแสคอลเลคเตอร์ เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ $\Delta I_{CB} \neq 0$ เช่นเดียวกับพาหะที่เคลื่อนที่ในทิศทาง $-x$ ที่ขั้ว E-B3-C3 สนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าเกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง z พาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนสะสมบริเวณผิวหน้าของอุปกรณ์เป็นผลให้ความแตกต่างของกระแสที่ขั้ว B4 และ C4 เกิดการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 4.19(ข) ในกรณีขั้ว E-B2-C2 และ E-B4-C4 ทิศทางของกระแสมีทิศทางเดียวกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก กระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเท่ากันไม่ตอบสนองสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.19(ก) การตัดผ่านของสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้าม B_y เป็นผลให้การเคลื่อนที่พาหะที่ขั้วใช้งาน E-B1-C1 เกิดการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทางสะสมที่ผิวหน้าของอุปกรณ์ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์สูงขึ้นตรงข้ามกับกระแสเบสที่ลดลง สำหรับการเคลื่อนที่พาหะที่ขั้วใช้งาน E-B3-C3 โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนในฐานรองทำให้กระแสเบสสูงกว่ากระแสคอลเลคเตอร์



รูปที่ 4.19 การเคลื่อนที่ของพาหะในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y และ B_x

(ก) สนามแม่เหล็กทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า (ข) สนามแม่เหล็กทิศทาง B_y และ

(ค) สนามแม่เหล็กทิศทาง B_y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Y และ B_{-Y}

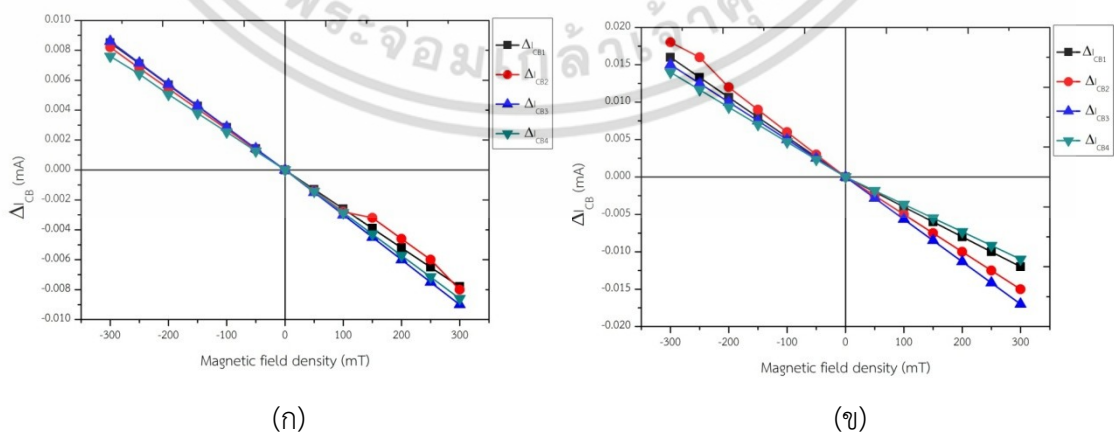
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ทิศทาง B_Y และ B_{-Y} ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ $I_E = 5 \text{ mA}$, 10 mA และ 40 mA โดยที่กระแสอิมิตเตอร์ 40 mA สามารถทำให้ค่าความไวสูงในทุกๆ ช่วงใช้งานคือ 1.84 และ 1.8 %/T ที่ขั้ว E-B1-C1 ในทิศทาง B_Y และ B_{-Y} ตามลำดับ ที่ขั้ว E-B3-C3 มีค่าความไว 1.8 และ 2 %/T เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Y และ B_{-Y}

กระแสอิมิตเตอร์ (mA)	ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก %/T (S_Y, S_{-Y})			
	ขั้วของแมกนีโตทรานซิสเตอร์			
	E-B1-C1	E-B2-C2	E-B3-C3	E-B4-C4
5	1.45, 1.29	-	1.26, 1.49	-
10	1.2, 0.78	-	1.2, 0.96	-
40	1.84, 1.62	-	1.8, 2	-

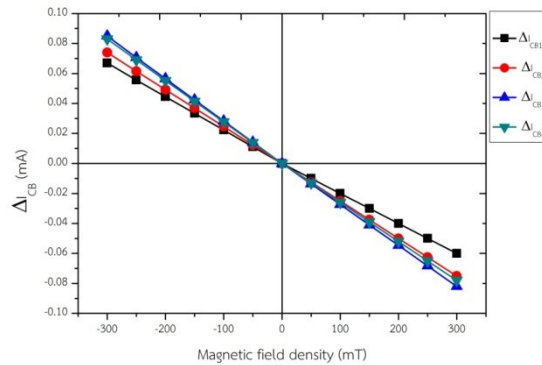
4.4.5 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Z และ B_{-Z} ที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าต่างๆ

รูปที่ 4.20-4.21 แสดงผลการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กในทิศทาง B_Z และ B_{-Z} ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ $0-300 \text{ mT}$ ทำการไบอัสที่กระแสอิมิตเตอร์ $5, 10$ และ 40 mA และวัดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB}) ในแต่ละขั้วของแมกนีโตทรานซิสเตอร์



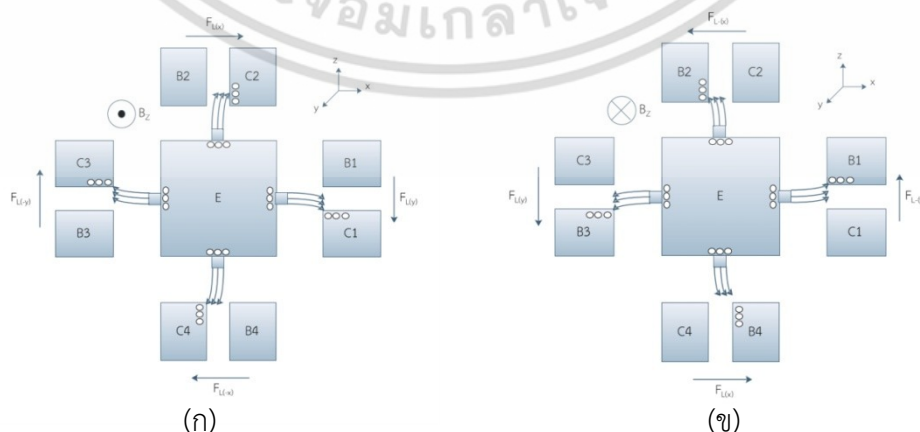
รูปที่ 4.20 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Z และ B_{-Z} ในการวัดแบบรวม (Merge mode) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสอิมิตเตอร์ (ก) 5 mA และ (ข) 10 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z และ B_z ในการวัดแบบรวม (Merge mode) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสลิมิตเตอร์ 40 mA

รูปที่ 4.22(ก) แสดงปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนพาหะ (carrier deflection) สามารถวิเคราะห์ได้จากพฤติกรรมของโฮล(hole) ซึ่งเป็นพาหะส่วนมากในอิมิตเตอร์โดยภาวะปกติเคลื่อนที่ในทิศทางคือ x , $-x$, y และ $-y$ จากอิมิตเตอร์ไปขั้วคอลเลคเตอร์และขั้วเบสทั้งสองด้าน แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กแนวตัดผ่านในทิศทาง B_z ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง x , $-x$, y และ $-y$ โดยแรงลอเรนซ์นี้กระทำกับโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปยังทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์ ในทุกๆขั้วใช้งาน การทดลองแบบรวมการตอบสนองสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นพร้อมๆกันในทุกขั้วใช้งาน กลไกการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะทำให้โฮลสะสมที่คอลเลคเตอร์มากกว่าขั้วเบสทำให้กระแสคอลเลคเตอร์สูงกว่ากระแสคอลเลคเตอร์ทุกขั้วใช้งาน โดยที่ขั้ว E-B1-C1 กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นทิศทาง x ทำให้พาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทาง y ขั้วใช้งาน E-B2-C2 กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นทิศทาง $-y$ ทำให้การเคลื่อนที่เบี่ยงเบนเกิดขึ้นในทิศทาง x ขั้วใช้งาน E-B3-C3 กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นทิศทาง $-x$ ทำให้การเคลื่อนที่เบี่ยงเบนเกิดขึ้นทิศทาง $-y$ และขั้วใช้งาน E-B4-C4 กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นทิศทาง y ทำให้การเคลื่อนที่เบี่ยงเบนเกิดขึ้นทิศทาง $-x$ รูปที่ 4.22(ข) แสดง ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนพาหะ ในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z พาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทางตรงข้ามซึ่งการสะสมของพาหะที่ขั้วเบสสูงกว่าขั้วคอลเลคเตอร์ในทุกๆขั้วใช้งาน เป็นผลให้กระแสเบสมีสค่าสูงกว่ากระแสคอลเลคเตอร์



รูปที่ 4.22 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะในการตอบสนองสนามแม่เหล็ก (ก) B_z และ (ข) B_z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

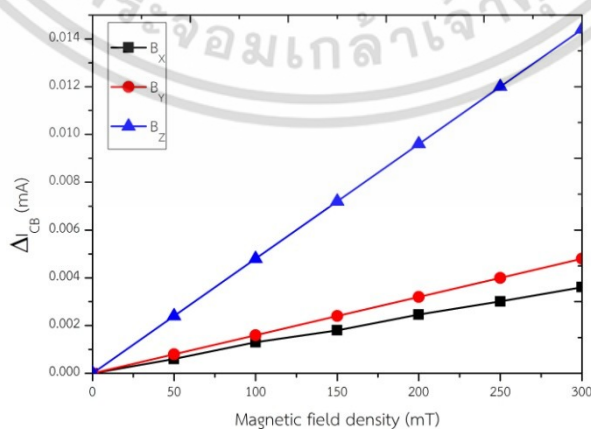
4.4.6 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z และ B_z

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ทิศทาง B_z และ B_z ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ $I_E = 5 \text{ mA}$, 10 mA และ 40 mA ค่าความไวสามารถคำนวณได้ในทุกๆ ช่วงใช้งานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ 40 mA ได้ค่าความไวที่สูงในช่วง $2-2.83\%/T$ ที่ช่วง E-B1-C1 โดยที่กระแส 5 และ 10 mA มีค่าความไวใกล้เคียงกันในช่วง $1.4-2.3 \%/T$

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z และ B_z

กระแสอิมิตเตอร์ (mA)	ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก $\%/T$ (S_z , S_z)			
	ช่วงของแมกนีโตทรานซิสเตอร์			
	E-B1-C1	E-B2-C2	E-B3-C3	E-B4-C4
5	2.1, 2.29	2.16, 2.21	2.43, 2.32	2.32, 2.05
10	1.6, 2.13	2, 2.4	2.26, 2	1.46, 1.86
40	2, 2.23	2.5, 2.46	2.73, 2.83	2.6, 2.76

รูปที่ 4.23 แสดงผลการรวมกระแสของทุกๆ ช่วงใช้งาน โดยเป็นผลของความแตกต่างระหว่างผลรวมกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสของทุกๆ ช่วงใช้งาน แสดงการตอบสนองในทิศทาง B_x , B_y และ B_z ผลการทดลองแสดงถึงอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถใช้งานได้ที่การทำงานพร้อมกันของทุกๆ ช่วงใช้งานและมีค่าเอาท์พุทของอุปกรณ์คือ $\Delta I_{CB(\text{total})} = I_{C(\text{total})} - I_{B(\text{total})}$ ซึ่งผลการตอบสนองของกราฟสามารถนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้งานแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในด้านต่างได้

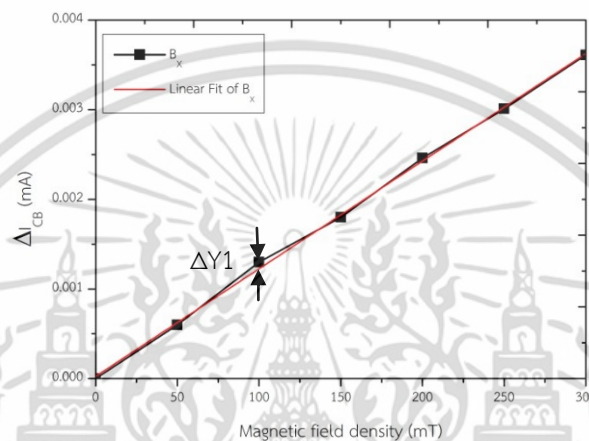


รูปที่ 4.23 การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x , B_y และ B_z ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

รูปที่ 4.24 แสดงคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ในการตอบสนองสนามแม่เหล็ก ทำการวิเคราะห์ในช่วงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-300 mT สามารถคำนวณได้ตามสมการ $Linearity = \frac{\Delta Y_1}{Y_{MAX} - Y_{MIN}} \times 100$ (%FS) ซึ่งจากกราฟการวิเคราะห์รูปที่ 4.24 ได้ค่า $\Delta Y_1 = 7.54 \times 10^{-5}$, $Y_{MAX} = 3.62 \times 10^{-3}$ และ $Y_{MIN} = 2.46 \times 10^{-5}$ เพราะฉะนั้นได้ค่าความเป็นเชิงเส้นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์มีค่า 2.09 %FS

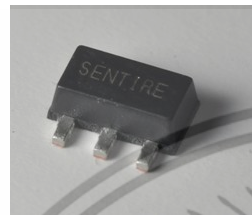


รูปที่ 4.24 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นในการตอบสนองสนามแม่เหล็ก

4.6 การประยุกต์ใช้งานแมกนีโตทรานซิสเตอร์

อุปกรณ์ตรวจจับ สนามแม่เหล็กชนิดแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถประยุกต์ใช้งาน ในกลุ่ม Magnetic Safety Proximity Sensor ใช้ในงานด้านการควบคุมความปลอดภัยแสดงดังรูปที่ 4.26 โดยหน้าที่ของ Magnetic Safety Proximity Sensor คือตรวจสอบระยะเวลาเปิด-ปิดที่มีความละเอียดสูงระดับมิลลิเมตร โดยมีการพัฒนาเพิ่มเติมในส่วนการเข้ารหัสแม่เหล็ก (Magnetic Encryption) กลายเป็น Magnetic Encryption Proximity Sensor (MEPS) สำหรับ MEPS มีระบบความปลอดภัยเพิ่มเติมเข้ามาจากคุณสมบัติที่สามารถตรวจสอบระยะเวลาเปิดปิดได้เพียงอย่างเดียว นั่นคือการพัฒนาเทคโนโลยีที่ป้องกันการรบกวนจากภายนอก ป้องกันการนำแม่เหล็กจากภายนอกมารบกวนการตรวจสอบสถานะที่แท้จริง ดังนั้น MEPS เหมาะติดตั้งกับอุปกรณ์ที่ต้องการระบบความปลอดภัยสูง ตัวอย่างเช่น สามารถนำไปใช้งานในระบบรักษาความปลอดภัยในระหว่างการขนส่งสินค้าที่มีมูลค่า เช่น เพชร ทอง เครื่องประดับ คือ ติดตั้ง MEPS ในกระเป๋าเงินเพื่อใช้สำหรับการขนส่งสินค้าที่มีมูลค่า อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กมีคุณสมบัติตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 ทิศทางเพราะฉะนั้นอาศัยคุณสมบัติของอุปกรณ์เป็นการประยุกต์เป็นเซนเซอร์วัดระยะทางที่สามารถมีคุณสมบัติถอดรหัสและเข้ารหัสได้ โดยเซนเซอร์วัดระยะทางในปัจจุบันไม่มีคุณสมบัติทางลอจิกนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในระบบมีเส้นแรงแม่เหล็กสามเส้นที่มีทิศทาง x , y , z และมีความหนาแน่นสนามแม่เหล็กแตกต่างกันตัดผ่านตัวอุปกรณ์ ซึ่งสามารถกำหนดรหัสได้ เช่น $(1000x, -500y, 1000z)$, $(500x, 1000y, 500z)$ เป็นต้น ตัวเลขด้านหน้าตัวแปรแสดงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในทิศทาง x , y และ z สัญญาณเอาต์พุตของอุปกรณ์ที่มีขนาดแตกต่างกันในแต่ละรหัสถูกถอดรหัสด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์และโปรแกรมที่ตั้งค่าไว้ เพราะฉะนั้นระบบของอุปกรณ์ตรวจสอบสนามแม่เหล็กที่มีคุณสมบัตินี้ถูกจรร-กรรมได้ยากและมีความปลอดภัยสูง



(ก)



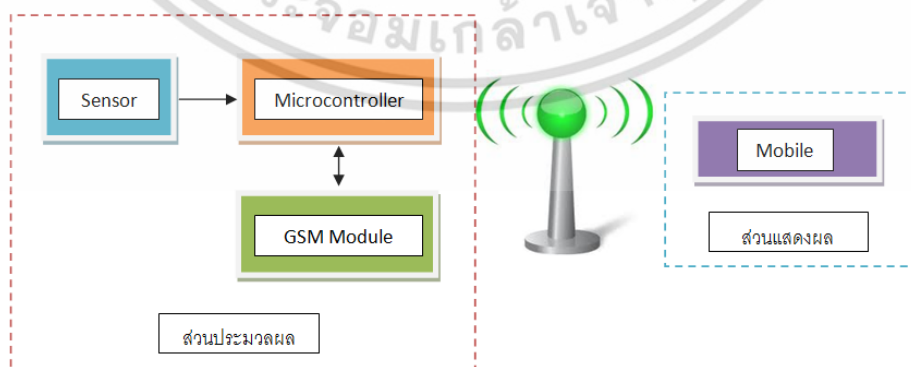
(ข)



(ค)

รูปที่ 4.25 ต้นแบบเซนเซอร์วัดระยะทางสำหรับตรวจสอบสถานะการเปิด-ปิดโดยวิธีการเข้ารหัสแม่เหล็ก (MEPS) (ก) แมกนีโตทรานซิสเตอร์ในบรรจุภัณฑ์ (ข) แมกนีโตทรานซิสเตอร์ในลายวงจร และ (ค) แมกนีโตทรานซิสเตอร์ในการประยุกต์ใช้งานวัดระยะทาง

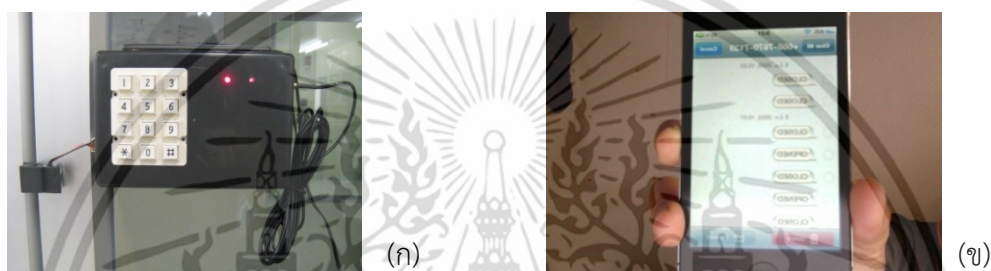
รูปที่ 4.27 แสดงไดอะแกรมการทำงานของระบบเครื่องบอกสถานะการเปิดและปิดโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงสัญญาณของ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ ระบบประกอบด้วยเซนเซอร์สนามแม่เหล็ก, ไมโครคอนโทรลเลอร์, GSM Module และส่วนประมวลผล ส่งสัญญาณในรูปแบบของ SMS ไปที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ของผู้พักอาศัย



รูปที่ 4.26 ไดอะแกรมการทำงานของเครื่องบอกสถานะการเปิดและปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.28 แสดงเครื่องบอกสถานะการณเปิดและปิดที่ประตูโดยทำงานร่วมกับ อุปกรณ์ตรวจจับ สนามแม่เหล็ก ส่วนของ อุปกรณ์ตรวจจับ สนามแม่เหล็กประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ แมกนีโต - ทรานซิสเตอร์ และส่วนที่เป็นแม่เหล็กถาวร ในสภาวะปิดเซนเซอร์ส่งสัญญาณอะนาล็อก 0 V และ สภาวะที่ประตูเปิดเซนเซอร์ส่งสัญญาณที่ 1.5 V โดยใช้ไฟเลี้ยงเซนเซอร์ 3V การเปลี่ยนแปลง สัญญาณของเซนเซอร์ที่ 0 หรือ 5 V เข้าไปส่วนของ A/D ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จากนั้นเข้าไปสู่ส่วนประมวลผลสำหรับการส่ง GSM Module ในการเลือ กส่งสัญญาณ SMS เข้าไปที่ โทรศัพท์เคลื่อนที่ของผู้พักอาศัย ระบบใช้ไฟเลี้ยง 220 V_{AC} โดยหลังจากเปิดสวิตซ์เครื่องแล้วสามารถ ตั้งเลขหมายที่ KEY PAD ของเครื่องได้ 5 หมายเลข รูปที่ 4.28 แสดง SMS จากโทรศัพท์เคลื่อนที่บ่ง บอสถานะการเปิดและปิดของประตู



รูปที่ 4.27 เครื่องบอกสถานะเปิดและปิดของประตู (ก) การติดตั้งเครื่องบอกสถานะ และ (ข) สถานะส่งสัญญาณที่หน้าจอโทรศัพท์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงการสรุปงานวิจัยอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก สามทิศทางคือ B_x , B_y และ B_z ซึ่งเป็นการสรุปผลการทำงานของการทำงานและผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ที่ใช้ใช้งานต่างๆ ผลของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์ ผลของการเปรียบเทียบค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก สรุปผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กในรูปแบบการทำงานแบบตัวเดียวและแบบรวม ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสที่มีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

1. แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้โดยอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนและการรวมตัวใหม่ของพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB})
2. แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถออกแบบและสร้างได้ด้วยเทคโนโลยีการผลิตชิมอส มีจุดเด่นของเทคโนโลยีสามารถออกแบบความกว้างอิมิตเตอร์ขนาดเล็กและสามารถสร้างร่วมกับวงจรรวมต่อไปได้
3. แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็ก ได้ในสามทิศทางคือ B_x , B_y และ B_z มีจุดเด่นคือ สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กสามทิศทางได้เพียงตัวเดียวและใช้พลังงานในการทำงานอุปกรณ์ที่น้อย
4. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส -แรงดันไฟฟ้าที่รอยต่อระหว่างเบส -คอลเลคเตอร์และเบส-อิมิตเตอร์ทั้งสี่ด้านมีค่าเท่ากันซึ่งแสดงถึงความสมมาตรของอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์
5. การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_x เกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสเอาท์พุทที่ใช้ใช้งาน E-B2-C2 และ E-B4-C4 โดยการเบี่ยงเบนของพาหะมีทิศทางตรงข้ามกันในทิศทาง Z การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_y เกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสเอาท์พุทที่ใช้ใช้งาน E-B1-C1 และ E-B3-C3 โดยการเบี่ยงเบนของพาหะมีทิศทางตรงข้ามกันในทิศทาง Z เช่นเดียวกัน
6. การตอบสนองสนามแม่เหล็กทิศทาง B_z เกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสเอาท์พุทที่ใช้ใช้งาน E-B1-C1, E-B2-C2, E-B3-C3 และ E-B4-C4 โดยการเบี่ยงเบนของพาหะเกิดขึ้นทั้งสี่ด้านของการฉีดพาหะอิมิตเตอร์ในทิศทางขนานกับผิวหน้าของอุปกรณ์
7. การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์ I_E แสดงถึงปริมาณการฉีดพาหะจากอิมิตเตอร์ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ปริมาณพาหะที่เบี่ยงเบนมากขึ้นนั่นคือความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และเบสมีค่าสูงขึ้นและการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมีผลต่อมุมการเบี่ยงเบนของพาหะเป็นผลให้ค่าความแตกต่างของกระแสเอาท์พุทสูงขึ้นเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตรงข้ามกัน เป็นผลให้ค่ากระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์มีความแตกต่างในทางตรงข้าม กราฟความสัมพันธ์ของความแตกต่างกระแสเอาท์พุทกับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมีความเป็นเชิงเส้นและมีคุณสมบัติฮิสเทอรีซิสที่ด้อยกว่า 3%FS

9. ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบสัมผัส ไม่เปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มขึ้นของกระแสฮิสเทอรีซิส ค่าความไวที่สูงที่กระแสฮิสเทอรีซิส 1 และ 10mA ในการทดลองแบบตัวเดียว และในการทดลองแบบรวมมีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูงที่กระแสฮิสเทอรีซิส 5mA แมกนีโตทรานซิสเตอร์ สามารถประยุกต์ใช้ในระบบความปลอดภัยเพื่อป้องกันสถานะการเปิด - ปิดและป้องกันการปลอมแปลงสัญญาณของประตูหรือกล่องบรรจุภัณฑ์ที่มีสินค้ามูลค่าสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] R S Popovic. **HALL Effect Devices**. London: Institute of Physics Publishing.2004.
- [2] C.S. Roumenin. **Solid State Magnetic Sensors**: Elsevier. 1994.
- [3] J. W. Gardner. **Microsensors**. New York: John Wiley & Sons. 1994.
- [4] Ristic Lj., Doan M T. and Paranjape M. “2-D integrated magnetic field sensor in CMOS technology,” **Circuit Syst.**, 1989. pp. 701-704.
- [5] Nagy A. and Trujillo H. “3D magnetic-field sensor using only a pair of terminals,” **Sensors and Actuators.**, A58, 1997. pp. 137-140.
- [6] Smy T. and Ristic Lj. “Optimization of Magnetotransistor Structure in CMOS Technology,” **IEEE Trans. Magnetic. Dev.**, vol 28, no. 5, 1992. pp. 2024-2030.
- [7] Radivoje S., Popovic R S. and Widmer R., “Magnetotransistor in CMOS Technology,” **IEEE Trans. Electron. Dev.**, ED-33, no. 9, 1986. pp. 1334-1340.
- [8] Ristic Lj., Smy T. and Baltès H P., “A lateral magnetotransistor structure with linear response to the magnetic field,” **IEEE Trans. Electron. Dev.**, ED-36, 1989. pp. 1076-1989.
- [9] Tikhonov R D., “Sensor on Bipolar Magnetotransistor with the Base in the well,” **Solid-State Electronic.**, vol 49, 2005. pp. 1302-1308.
- [10] Tikhonov R.D., Kozlov A.V., Chernova, Yu.A. and Polomoshnov S.A., “ Increase sensitivity of the sensor based on bipolar magnetotransistor by minimization initial output offset,” **International Siberian Conference** ., 2009. pp. 216-221
- [11] Tikhonov R.D., Kozlov A.V., Krasukov A.Yu., Polomoshnov, S.A. and Balashov A.G., “ Bipolar magnetotransistor sensitivity dependence on temperature , ” **Micro/Nanotechnologies and Electron Devices.**, 2009. pp. 151-153.
- [12] Phetchakul T., Pengchan W. and Leepattarapongpan C., “Three Terminals Magnetotransistor Sensing by Difference of Base and Collector Current,” **International Conference on Materials for Advance Technologies**, 2005.
- [13] Leepattarapongpan C., Phetchakul T., Penpondee N., Pengpad P., Srihapat A., Jeamsaksiri W., Chaowicharat E., Hruanun C. and Poyai A., “The Low Power Magnetotransistor Based on CMOS Technology.” **IEEE Sensors Conference.**, 2011. pp. 1-4.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Leepattarapongpan C., Phetchakul T., Penpondee N., Pengpad P., Srihapat A., Jeamsaksiri W., Chaowicharat E., Hruanun C. and Poyai A., “The Magnetotransistor for 2-axis Magnetic Field measurement Based on CMOS Technology.” **Proceeding of International Symposium on Integrated Circuit.**, 2014. pp. 1-4.
- [15] Popovic R S., “The Vertical Hall-Effect Device,” **IEEE Electron Devices Lett.**, EDL-5, 1984. pp.357-358.
- [16] Henry P. Baltes, “Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor,” **IEEE Trans. Electron Device.**, vol. 74, no. 8, 1986. pp. 315-317.
- [17] Trujillo H., Nagy A. and Cruz J.C., “Influence of topology on the response of lateral magnetotransistor,” **Sensors and Actuators.**, A45, 1994. pp. 179-182.
- [18] Nakamura T. and Maenaka K., “Integrated Magnetic Sensor,” **Sensors and Actuators A.**, vol.35, 1990. pp.21-23.
- [19] Nagy A. and Trujillo H., “Highly sensitive magnetotransistor with new topology,” **Sensors and Actuators.**, A65, 1998. pp. 97-100.
- [20] Ristic Lj., Baltes H P., Smy T. and Filanovsky I., “Suppressed Sidewall Injection Magnetotransistor with focus Emitter Injection and Carrier Double Deflection,” **IEEE Electron Devices Lett.**, EDL-8, no. 9, 1987. pp.395-397.
- [21] Kordic S., “Integrated 3-D Magnetic Sensor Based on an n-p-n Transistor,” **IEEE Electron Devices Lett.**, EDL-7, no. 3, 1986. pp. 196-198.
- [22] Jungmin Kim, Jinyi Lee, Jongwoo Jun, Minhuy Le and Changyun Cho, “Integration of Hall and Giant Magnetoresistive Sensor Arrays for Real-Time 2-D Visualization of Magnetic Field Vectors, ” **IEEE Transactions on Magnetics.**, vol.48, issue.11, 2012. pp. 3708-3711.
- [23] Ripka P. and Janosek M., “ Advances in Magnetic Field Sensors, ” **IEEE Sensors Journal.**, vol.10, issue.6, 2010. pp. 1108-1116.
- [24] Young Jae Min, Chan Keun Kwon, Hoon-Ki Kim, Chulwoo Kim, Soo Won Kim, “ A CMOS Magnetic Hall Sensor Using a Switched Biasing Amplifier , ” **IEEE Sensors Journal.**, vol.12, issue.5, 2012. pp. 1195-1196.
- [25] Leepattarapongpan C., Phetchakul T., Penpondee N., Pengpad P., Chaowicharat E., Hruanun C. and Poyai A., “Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination – Deflection Effect,” **IEEE Sensors Journal.**, vol.10, no.2, 2010. pp. 294-299.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [26] Leepattarapongpan C., Phetchakul T., Penpondee N., Pengpad P., Srihapat A., Jeamsaksiri W., Chaowicharat E., Hruanun C. and Poyai A., “ A Merge Magnetotransistor for 3-axis magnetic field measurement Based on Carrier Recombination – Deflection Effect.” **Microelectronics Journal.**, vol.45, 2014. pp. 565-573.
- [27] Kozlov A.V., Tikhonov, R.D. and Polomoshnov, S.A., “Development of planar magnetotransistor design by three-dimensional device-technological modeling,” **Micro/Nanotechnologies and Electron Devices.**, 2010. pp. 208-212.
- [28] Guo-Ming S. and Chih-Ping Y., “Two-Dimensional Differential Folded Vertical Hall Device Fabricated on P-type Substrate Using CMOS Technology ,” **IEEE Sensors Journal.**, issue.99, 2013. pp. 1.
- [29] Edelstein A.S., Petrie J.R., Sreenivasulu G., Srinivasan G., Viehland D. and Jie Fang, “Magnetoelectric sensors: Sensitive and potentially low-cost magnetic sensors, ” **IEEE Sensor Conference.**, 2012. pp. 1-3.
- [30] ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์, โสภณ พรหมชัย, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. “ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26, เดือนพฤศจิกายน ปี 2546, หน้า 1419-1424
- [31] ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์, วีระเพ็ญจันทร์, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. “แมกนีโตทรานซิสเตอร์โหมดการทำงานสามขั้ว” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 27, พฤศจิกายน 2547. หน้า 273-276
- [32] ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์, วีระ เพ็ญจันทร์, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. “ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28, ตุลาคม 2548. หน้า 1225-1228

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, W. Jeamsaksiri, E. Chaowicharat, C. Hruann and A. Poyai “A merged magnetotransistor for 3-axis magnetic field measurement based on carrier recombination-deflection effect”, *Microelectronics journal* (45) 2014 pp 565-573.
2. C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, W. Jeamsaksiri, E. Chaowicharat, C. Hruann and A. Poyai “The Increase Sensitivity of PNP-Magnetotransistor in CMOS Technology”, *International Symposium on Integrated* 2014 pp 420-423.
3. C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, W. Jeamsaksiri, E. Chaowicharat, C. Hruann and A. Poyai “The Magnetotransistor for 2-Axis Magnetic Field Measurement in CMOS Technology”, *ECTI-CON* 2015 pp 1-4.
4. C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, W. Jeamsaksiri, E. Chaowicharat, C. Hruann and A. Poyai “The Effect Injection Width and Temperature-Offset Compensation of Magnetotransistor”, *Procedia Eurosenors XXV* 2011 pp 1-4.
5. C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, E. Chaowicharat, C. Hruann and A. Poyai “The Low Power 3D-Magnetotransistor Based on CMOS Technology”, *IEEE Sensors* 2011 pp 1-4.



Volume 45, Issue 6, June 2014

ISSN 0026-2692

MICROELECTRONICS JOURNAL

<http://www.elsevier.com/locate/mejo>

EDITOR-IN-CHIEF

Eby G. Friedman

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Contents lists available at ScienceDirect

Microelectronics Journal

journal homepage: www.elsevier.com/locate/mejo

A merged magnetotransistor for 3-axis magnetic field measurement based on carrier recombination–deflection effect



Chana Leepattarapongpan^{a,b}, Toempong Phetchakul^b, Naritchaphan Penpondee^a,
Puttapon Pengpad^a, Arckom Srihapat^a, Wutthinan Jeamsaksiri^a, Ekalak Chaowicharat^a,
Charndet Hruanun^a, Amporn Poyai^a

^a Thai Microelectronics Center (TMEC), National Electronics and Computer Technology Center, Chachoengsao, Thailand
^b Department of Electronics, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 August 2013
Received in revised form
24 March 2014
Accepted 31 March 2014
Available online 4 May 2014

Keywords:

Merged magnetotransistor
Carrier recombination
Carrier deflection
Lorentz force

ABSTRACT

This article presents a novel magnetotransistor based on carrier recombination–deflection effect for detecting magnetic field in three dimensions (B_x , B_y , and B_z) by relying on the difference between base and collector currents (ΔI_{CB}). This device used low biasing current. It was designed and fabricated using CMOS fabrication technology. The device structure consisted of one emitter, 4 collectors and 4 bases. All four collector terminals were connected with each other. The same was true for the four base terminals. LOCOS oxide was grown to surround the emitter area to limit lateral carrier loss, and therefore reducing the overall biasing current. The experiment showed that, at 0.2 mA of biasing current, the B_x , B_y , and B_z direction sensitivity to magnetic field within the range of 0–400 mT are 2, 5 and 14.5%/T, respectively. This research on the merged magnetotransistor produced magnetic sensors with small size, high performance with wide range of applications.

© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Typically, magnetic sensors based on Hall sensors, magnetodiode, magnetotransistor, and MAGFET structures can only sense magnetic field in one direction which can either be parallel or perpendicular to the chip surface. As a result, there is a need for magnetic sensors that can sense magnetic field in two or three directions with high sensitivity and low biasing current or voltage [1–5].

Normally, a magnetotransistor can detect magnetic field in one direction perpendicular to the surface of the device. It relies on 2 mechanisms, namely, modulation current injection mechanism and carrier deflection mechanism. This particular structure consists of 2 bases, 1 emitter, and 2 collectors. Its operation is based on the relationship between the change in collector current and the magnetic field density [4–14]. A novel design that can detect magnetic field in multiple directions is the main purpose of this article. This new magnetotransistor structure is called merged magnetotransistor. It relies on carrier recombination–deflection mechanism having base doping to be the same type as the substrate. The main purposes are multiple direction detection and higher sensitivity in order to increase application range. To develop these magnetotransistors with the above properties, the design relied on following strategies [15–25].

1. The quantity of deflected carriers by Lorentz force represent the fact that carrier recombination rate and deflected carrier rate are changing in opposite directions.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.mejo.2014.03.016>
0026-2692/© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

2. The movement of majority carriers in the emitter have to be in a single direction. Furthermore, the deflection has to also be in a single direction. In this research, the sensitivity of magnetotransistors in relation with emitter current and magnetic field density can be expressed as in [11].

$$S_R = \frac{\Delta I_{CB}}{I_E \Delta B_z} \quad (1)$$

where, ΔI_{CB} is the difference between base and collector currents, I_E is the biasing current of the emitter and B is magnetic field density.

This article presents a merged magnetotransistor with ability to sense magnetic field in B_x , B_y , and B_z axes by relying on the difference between base and collector currents (ΔI_{CB}) between carrier density inside the base region represented by base current and carrier deflection collected inside the collector represented by the collector current. By connecting the four terminals of base or collector together, the sensitivity on the vertical axis (B_z) can be increased by as much as 4 times of the original value. The device can also detect the field in the lateral axes (B_x and B_y) by relying on the recombination and deflection in the base region and the imbalance between deflected carrier at opposite terminals. The device used less than 1 mA of biasing current and had good linearity. This device is suitable as a discrete device and can be applied in the industry operating as sensors for speed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

measurement, magnetic field density, electrical current measurement, magnetic strip card readers and relative position sensors.

2. Structure and operation principle

2.1. Structure of a merged magnetotransistor

The structure of a merged magnetotransistor is presented in Fig. 1. This device is a PNP structure with emitter and collectors made from p-type doping (Boron) and the base area was made from n-type doping (Phosphorus). The structure consists of a single emitter, four collectors, and four bases. The four collectors are connecting to each other to form a single terminal. The same is true for the four bases. The whole device was fabricated on an n-type silicon substrate. LOCOS oxide structures were thermally grown to surround the emitter area. The four emitter width (W_E) of $5\ \mu\text{m}$ was left to provide carrier injection paths. The space between the emitter and collectors (base width) was $20\ \mu\text{m}$. Each collector was designed to have one side making a 45° angle to the carrier movement path. Full packaging of the device is shown in Fig. 1(b). It contains a single chip that has already been wire bonded onto an IC package which is embedded on PCB for practical and convenient operation.

The device, fabricated by CMOS fabrication technology, is illustrated in Fig. 2. The substrate was $5\text{--}10\ \Omega\ \text{cm}$ n-type (100) silicon wafer with thickness of $650\ \mu\text{m}$. Firstly, $25\ \text{nm}$ of silicon dioxide was grown by thermal oxidation process. A silicon nitride film then was deposited on the field oxide (Fig. 2a) then it was patterned by photolithography technique for opening nitride windows to reveal the field oxide underneath it. Then LOCOS process was performed as shown in Fig. 2b. Collector and emitter area were formed by P^+ boron ion implantation (Fig. 2c). The base terminal was implanted with arsenic at a dose of 5×10^{15} ions/ cm^2 with the same doping type as the substrate after the third application of photolithography process. After annealing, every terminal should have junction depth (x_j) of approximately $1\ \mu\text{m}$ as shown in Fig. 2d. Finally metal deposition and patterning for contact formation were done by sputtering technique and photolithography technique respectively to finish the device (Fig. 2e).

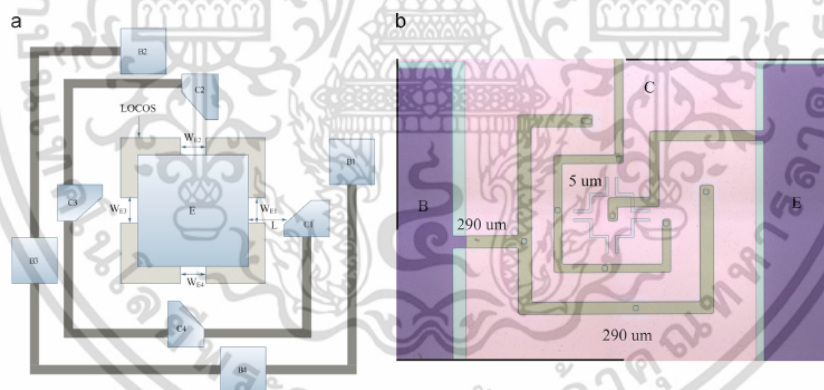


Fig. 1. Merged magnetotransistor structure (a) top view and (b) photograph of device.

2.2. Operating principle

Fig. 3 shows the structure and the operating principle of the three-terminal magnetotransistor [15]. It consists of an emitter, collector, and base contacts with capability to detect the magnetic field in vertical and lateral directions. The operating principle of a three-terminal magnetotransistor is based on Hall effect. In the absence of a magnetic field, equal numbers of charge carriers arrive at the base and collector terminal. If there is a magnetic field perpendicular to the direction of travel of the charge carriers, they are deflected toward the base or collector terminal, depending on the direction of the field. The deflection of carriers (holes) due to Lorentz force, while passing through magnetic field, creates the difference between base and collector currents, ΔI_{CB} [15]. The change in base current is from the deflected holes and recombination along the base width, whereas the change in collector current is only from the deflected holes. The detection of vertical magnetic field (B_z) causes Lorentz force in the y-axis. The carriers deflection will occur at B and C terminals. The difference between the base current and the collector current, ΔI_{CB} , as a result of magnetic induction, B_z , can cause the carrier to deviate in y-axis with $\theta_{H(y)}$ angle to its original path.

Under normal condition without magnetic field passing through the device, emitter current is equal to the combination of base and collector currents, $I_E = I_C + I_B$ and $\Delta I_{CB} = I_C - I_B = 0$. The magnetotransistor is similar in principle to a normal bipolar transistor but designed to have much longer base width ($> 10\ \mu\text{m}$) to maximize the deflection of base current, and as a result, the gain (β) is low. Ideally, the recombination current (I_R) should be equal to the collector current (I_C). The biasing current at an emitter can be written in terms of current density and can be expressed as [11]

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

where, J_{px} is the current density along x-axis, d is the effective depth of the current and W_E is emitter width.

Fig. 4 shows the equivalent carrier deflection area responding to the magnetic field in vertical directions through an analytical model of the magnetotransistor. The changing base current and collector current due to recombination-deflection in response to the magnetic field in vertical direction can be calculated by

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

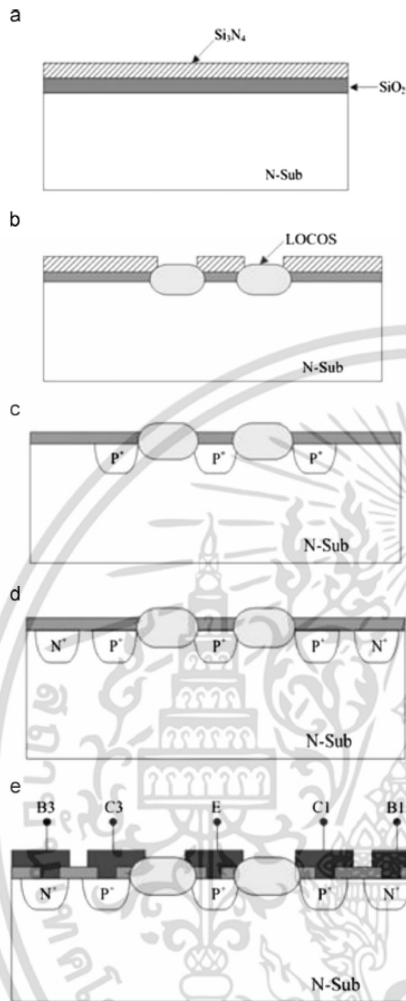


Fig. 2. Process flow for merged magnetotransistor: (a) growth of SiO₂ and Si₃N₄ on Si surface, (b) LOCOS oxide, (c) implantation for emitter and collector terminals, (d) implantation for base contact and (e) pattern of the metal pad for wire bonding.

integrating the current density J_{px} in the lateral plane with the area defined by ΔYd . The difference of collector and base current (ΔI_{CB}) during an application of magnetic field in the vertical direction will cause charge carriers to deflect in the y-axis and the change of $\theta_{H(y)}$ which can be analyzed using the first equation

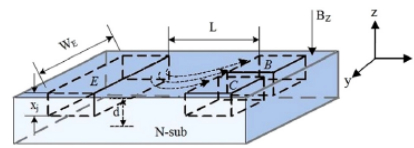


Fig. 3. Carrier deflection (holes) in response to vertical magnetic field.

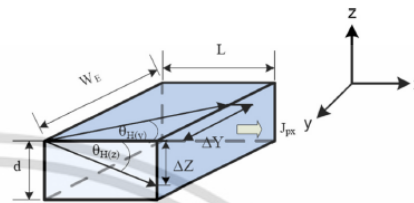


Fig. 4. Equivalent box active area in the vertical direction.

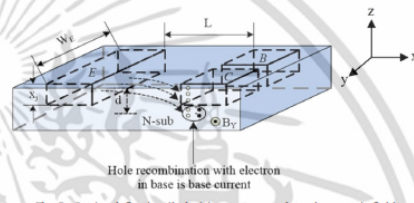


Fig. 5. Carrier deflection (holes) in response to lateral magnetic field.

$I_E = \Delta I_C + \Delta I_B$ as shown in (3) [15]. $\theta_{H(y)}$ can be found by $\tan \theta_{H(y)} = \mu B_z$ [11]

$$\Delta I_{CB(y)} = J_{px} \cdot d \cdot \Delta W \tag{3}$$

where

$$\Delta W_E = \Delta Y = \mu \cdot L \cdot B_z \tag{4}$$

Using (3) and (4) we obtained for $\Delta I_{CB(y)}$ [15]:

$$\Delta I_{CB(y)} = J_{px} \cdot d \cdot L \cdot \mu \cdot B_z \tag{5}$$

where μ is hole mobility, d is an effective depth of the current and B_z is magnetic field density in z-axis.

Fig. 5 shows the response to magnetic field in lateral direction (B_y) and holes current in x-direction. Therefore, the resulting Lorentz force and holes deflection will be in $-z$ -direction. The equivalent carrier deflection area for an analytical model of the changing base current and collector current due to recombination-deflection of the lateral direction can be calculated by integrating the current density J_{px} in the lateral plane with the area defined by ΔZ . W_E in (6). The movement of charge carriers in z-axis causes the change in angle $\theta_{H(z)}$ with ΔZ change.

The equation shows the relationship of ΔI_{CB} , for detecting the lateral magnetic field as presented in (6), and the difference in collector and base currents [15]:

$$\Delta I_{CB(z)} = J_{px} \cdot W_E \cdot \Delta d \tag{6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where

$$\Delta d = \Delta Z = L \cdot \tan \theta_{Hy} \tag{7}$$

$$\Delta d = \Delta Z = L |E_H / E_X| \tag{8}$$

where E_H is Hall electric field and E_X is applied (external) electric field.

Using (6) and (7) we obtain for $\Delta I_{CB(1)}$ [15]:

$$\Delta I_{CB(1)} = J_{pk} \cdot W_E \cdot L \cdot \tan \theta_{Hy} \tag{9}$$

where L is the distance from the emitter to base and collector terminals (base width).

From Fig. 5 the device can detect magnetic field in $-y$ -direction and found that base and collector current changed in the y -direction while amplitudes are different because ratio of recombination at surface and substrate are not equal.

3. The mechanism of merged magnetotransistor

The three-terminal magnetotransistor has an ability to detect magnetic field in the B_z and B_y [15]. However, it cannot be detected in the B_x direction since it is along the same direction as the current of the device. The operating principle of a device capable of detecting in three axes is shown in Fig. 6. This structure also increases the sensitivity of magnetic field detection by combining each group of four collectors and four bases into one collector terminal and one base terminal, respectively. The merged magnetotransistor in this article can inject the carrier in four directions. Without magnetic field, the base and collector currents will be identical ($\Delta I_{CB}=0$) and therefore the total differential current can be expressed as

$$\Delta I_{CB(\text{total})} = (I_{C1} + I_{C2} + I_{C3} + I_{C4}) - (I_{B1} + I_{B2} + I_{B3} + I_{B4}) \tag{10}$$

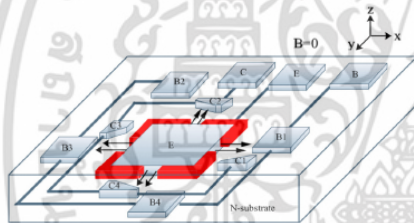


Fig. 6. Carrier flow without magnetic field ($B=0$).

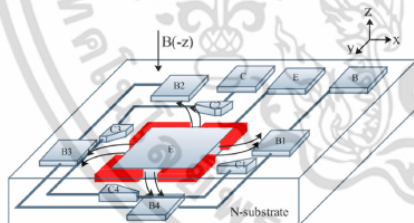


Fig. 7. The directions of carrier deflection during the detection of magnetic field in $-z$ -direction.

3.1. Vertical magnetic field: B_z

Fig. 7 shows the detection of vertical magnetic field, $B(-z)$, that causes deflection of carriers in all four terminals. The deflected carriers will increase the base current and reduce the collector current ($\Delta I_{CB} > 0$). The ratio of this change will be the same for every collector-base pairs. The angular collector can increase the chance of carrier recombination, and hence higher base current.

According to the Hall effect equation, $\tan \theta_H = \mu B_z$, the deflection angle will depend on magnetic field strength. This would require high level of magnetic field density in order to deflect carrier to base area. Eq. (11) shows the sum of ΔI_{CB} from the four terminals. Furthermore, Eq. (12) shows the 4-time increase of the magnetic field sensitivity relative to the x and y -axis:

$$\Delta I_{CB(-z)} = (\Delta I_{C1} + \Delta I_{C2} + \Delta I_{C3} + \Delta I_{C4}) - (\Delta I_{B1} + \Delta I_{B2} + \Delta I_{B3} + \Delta I_{B4}) \tag{11}$$

$$S_R = \frac{4 \Delta I_{CB}}{I_E \Delta B_z} \tag{12}$$

3.2. Lateral magnetic field: B_x, B_y

The detection of lateral magnetic field, B_y , causes Lorentz force in the z -axis. The carrier deflection will occur at B(1)–C(1) terminals in the $-z$ -direction and B(3)–C(3) terminals in z -direction. Fig. 8 shows the carrier movement directions. Eq. (13) shows the relationship for magnetic field detection in B_y direction:

$$\Delta I_{CB(y)} = (\Delta I_{C1} + I_{C2} + \Delta I_{C3} + I_{C4}) - (\Delta I_{B1} + I_{B2} + \Delta I_{B3} + I_{B4}) \tag{13}$$

The detection of lateral magnetic field, B_x , causes deflection of carriers to occur at B(2)–C(2) terminals in the $-z$ -direction and B(4)–C(4) terminals in z -direction. Eq. (14) shows the relationship for magnetic field detection in B_x direction:

$$\Delta I_{CB(x)} = (I_{C1} + \Delta I_{C2} + I_{C3} + \Delta I_{C4}) - (I_{B1} + \Delta I_{B2} + I_{B3} + \Delta I_{B4}) \tag{14}$$

The mechanism in the lateral direction (B_y) of merged magnetotransistor is the change in current occurring at B1–C1 and B3–C3 terminals. The hole carriers at B1–C1 will deflect in $-z$ -direction (see Fig. 8) and then recombine with electrons in the substrate, which is the same type as base, to become base current I_{B1} and lower collector current I_{C1} . In Fig. 8, in the case of magnetic field detection comparison of y and $-y$ axis, identical sensing magnitude occurred due to the structure symmetrical design. This gives $\{(\Delta I_{C1} + \Delta I_{C3}) - (\Delta I_{B1} + \Delta I_{B3})\}_y = \{(\Delta I_{C1} + \Delta I_{C3}) - (\Delta I_{B1} + \Delta I_{B3})\}_y$ and the result is the same on x -axis detection as well.

Meanwhile the $-x$ -direction carriers at B3–C3 will deflect in z -direction causing higher base current I_{B3} and lower collector current I_{C3} . However, the ratio of this change will not be the same

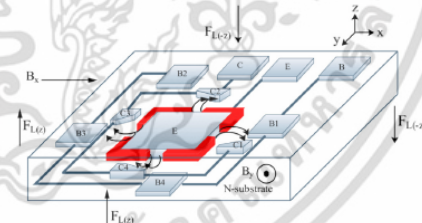


Fig. 8. The directions of carrier deflection during the detection of magnetic field in x -direction and y -direction.

as at B1–C1. The difference is caused by the asymmetric and recombination–deflection effect of merged magnetotransistor having the same doping type between base and substrate.

Fig. 9 shows the simulation result in the case of lateral magnetic field in opposite directions (y and –y directions). The difference in current density will be displayed as different shading colors. The structure was generated and simulated by TCAD Sentaurus simulation package. This program accepts magnetic sensor parameters such as emitter width, base width, doping concentration, current density, magnetic field density and magnetic field direction. Using these parameters the module calculates the integration of Hall theory and finally it calculates the output density for different magnetic field directions.

For simulate magnetotransistor with specification, emitter width (W_E)=10 μm , base width (L)=30 μm , magnetic field density (B)=0.1 T, doping concentration (E, C)= $1e^{-20} \text{cm}^{-3}$ and base= $5e^{-19} \text{cm}^{-3}$ are used. The figure shows a cross sectional image of the merged magnetotransistor with charge carrier moving from emitter toward collector and base electrodes. The position of emitter covers both base and collector electrodes symmetrically. In this simulation, the bias current of emitter was set from 0 to $6 \times 10^{-8} \text{A cm}^{-2}$. The magnetic field was varied both in positive and negative directions. With current normally flowing in x-direction and magnetic field density of 0.1 T, the different shades of colors are shown at the bottom of base terminal, and hence the difference in current density. Simulation plot indicating device's sensitivity on +y-direction magnetic field influence shows high

current density on base terminal in Fig. 9(a). On the other hand base current showed in Fig. 9(b) are dispersed by –y-direction magnetic field deep down into the substrate leading to low base current density. The recombination–deflection effect of the merged magnetotransistor is different from the conventional magnetotransistor which is insensitive to the reversal of field directions.

Fig. 10 shows the simulated relationship between base and emitter current for magnetic field in y and –y-directions. The base current in –y-direction is 7 times more than that in y-direction. The magnetic field in the –y-direction causes the Lorentz force in the –z-direction. Therefore, the recombination current in the base region (substrate) will be higher than the one in the +y-direction which caused Lorentz force in the z-direction and the deflected carriers collected at the surface of the magnetotransistor. Fig. 11 shows the relationship between collector and emitter current. These two figures show the difference in current flow detecting magnetic field in opposite directions. From both simulation result and theoretical work, it shows a merged magnetotransistor capable of detecting magnetic field in 3 separate directions. Furthermore, magnetic field in positive and negative directions or opposite charge carrier paths will result in differential output. Combining these output signals together will produce a higher signal level and hence higher overall sensitivity. However, further work is still required for the device to be able to detect in every

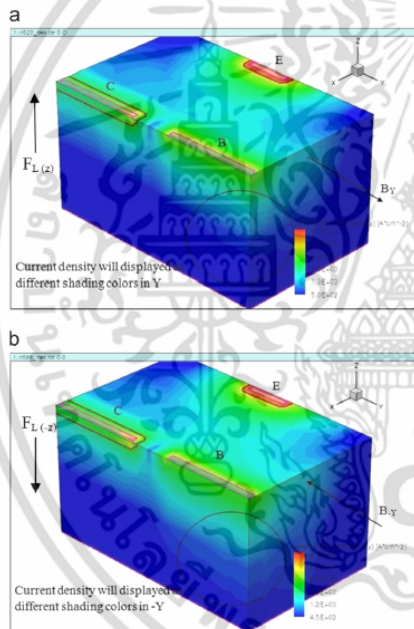


Fig. 9. The current density by 3-D modeling with magnetic field: (a) y-direction and (b) –y-direction.

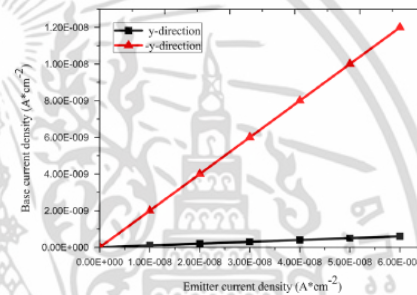


Fig. 10. Simulation results between base and emitter currents for magnetic field density in y and –y-directions.

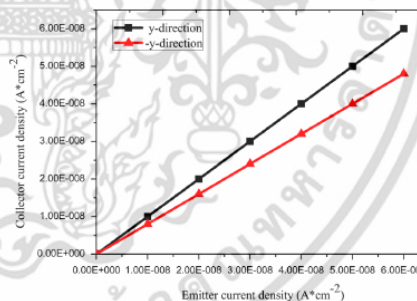


Fig. 11. Simulation results between collector and emitter currents for magnetic field density in y and –y-directions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

direction simultaneously in the case of multiple axis magnetic field.

4. Result and discussion

4.1. Interface circuit

The interface circuit used in this experiment is shown in Fig. 12 (a). The circuit biases a merged magnetotransistor by forcing a constant current ($V_{supply} = 1.5V$) into emitter (I_E). The collector (C) and base (B) are connected to R_C and R_B . The input offset can be compensated by adjusting the resistors, R_C and R_B . Finally, the difference between base and collector current (ΔI_{CB}) can be shown in terms of output voltage (V_O). Fig. 12(b) shows the measurement setup for the magnetotransistor. The magnetic field was generated by magnetic generator in the vertical direction. The magnetic field density can be adjusted through the applied voltage and current and measured by a Gaussmeter (Lakeshore 475 DSP Gaussmeter). The merged magnetotransistor was installed inside the gap between the two magnetic poles. The output of the magnetotransistor was fed through the interface circuit and then measured as an output voltage by a voltmeter. The magnetic field direction can be changed by rotating the merged magnetotransistor itself to the required orientation.

4.2. The effect of 45° collectors

Fig. 13(a) shows the original design having the carrier accepting side perpendicular to the carrier path [15]. According to the Hall effect equation, $\tan \theta_H = \mu B_z$, the deflection angle will depend on the magnetic field strength. This would require high level of magnetic field strength in order to deflect the carrier to base area. The merged magnetotransistor was designed to have a 45° degree angle on the collector side in order to increase the probability of collecting the deflected carriers (see Fig. 13b). Fig. 14 shows the relationship between output voltage and magnetic field density at collector angles 90° and 45°.

4.3. Response to magnetic field in x-direction

Fig. 15(a) and(b) shows the response to magnetic field in x-direction of a merged magnetotransistor by varying the magnetic field density from 0 to 400 mT. The output voltage was

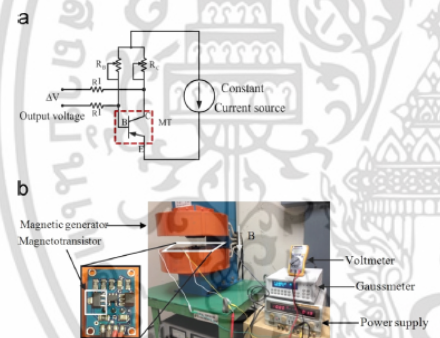


Fig. 12. (a) Interface circuit and (b) photograph of the system for magnetic field measurement.

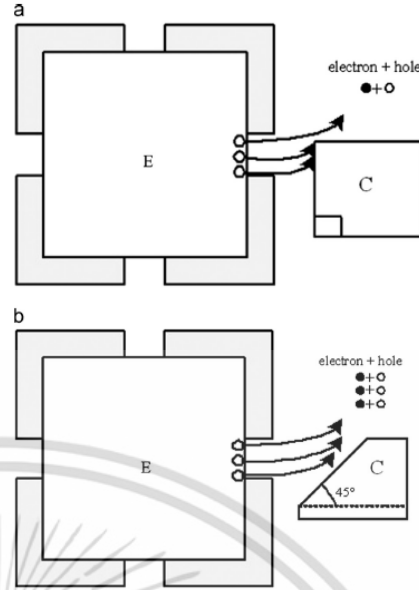


Fig. 13. Deflected carrier movement for collector angles at (a) 90° and (b) 45°.

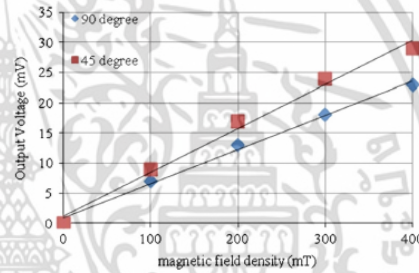


Fig. 14. Relationship between magnetic field density and output voltage between collector angles at 45° and 90°.

measured at different biasing currents of 0.2 and 0.4 mA. 5 Sampling points covering all the wafer area had been used for magnetic field density test. From the result, it shows monotonic increase of output response as a function of field density. Furthermore, for the same field density, the output voltage increases as a function of emitter current.

4.4. Response to magnetic field in y-direction

Fig. 16(a and b) shows the response to magnetic field in y-direction of a merged magnetotransistor. The measurement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

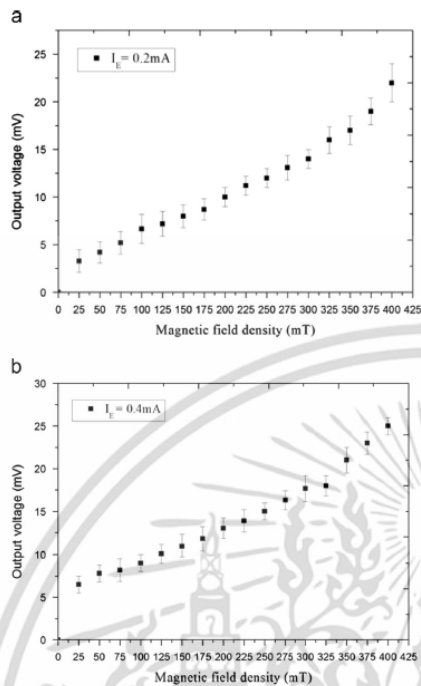


Fig. 15. The x-direction output response of a merged magnetotransistor at different biasing currents (a) $I_E = 0.2 \text{ mA}$ and (b) $I_E = 0.4 \text{ mA}$.

was performed similarly to the previous case. The increase of emitter current caused output voltage to rise with good linearity. Raising the magnetic field density also caused the output voltage to increase linearly as well.

The magnetic field in opposite directions ($-x$ -direction and $-y$ -direction) can be measured with similar result to the $+x$ and $+y$ directions. For example, to measure in $+x$ -direction will result in Eq. (14), i.e. $\Delta I_{CB(x)} = I_{C1} + \Delta I_{C2} + I_{C3} + \Delta I_{C4} - (I_{B1} + \Delta I_{B2} + I_{B3} + \Delta I_{B4})$ where the second magnetotransistor will collect deflected carriers at the substrate, whereas the fourth magnetotransistor will collect carriers at the surface. Conversely, for $-x$ -direction, the second magnetotransistor will collect carriers at the surface, and the fourth magnetotransistor will collect carriers at the substrate. Therefore, the current difference will be very similar in both cases and cannot be distinguished from the other. As a result, the next evolution step is to develop a magnetotransistor that can separate and truly detect magnetic field in all 6 directions.

The result, as displayed in Figs. 15 and 16, shows a non-zero offset voltage. This is a result from asymmetric topology of collector and base terminals, such as shape, position, emitter spacing, and doping concentration, causing small difference between collector and base currents of merged magnetotransistor. The simpler offset canceling technique can be performed by

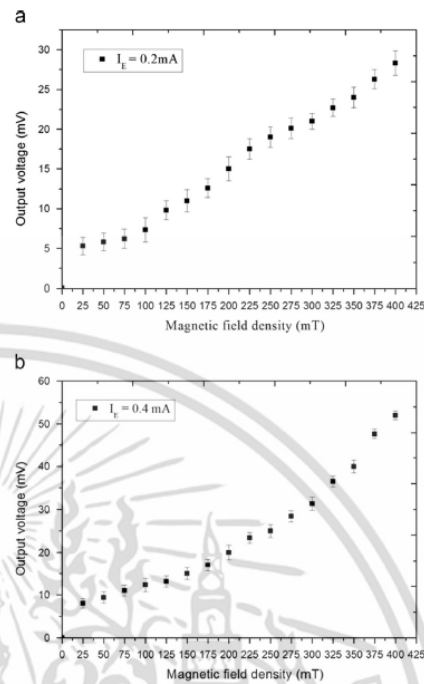


Fig. 16. The y-direction output response of a merged magnetotransistor at different biasing currents (a) $I_E = 0.2 \text{ mA}$ and (b) $I_E = 0.4 \text{ mA}$.

adjusting the resistance of the interface circuit connecting to the collector and base terminals. On the other hand, redesigning the shape of the magnetotransistor to be symmetrical and separating terminal connections can reduce the offset voltage and also increase the sensitivity as well.

4.5. Response to magnetic field in z-direction

Fig. 17(a and b) shows a relationship between $-z$ -direction magnetic field strength and the output voltage of a merged magnetotransistor. The result came from a combination of carrier injection in four directions, and as a result, the output voltage was higher than the case of x -direction or y -direction separately. The increase of emitter current is a result of higher hole carrier being injected from emitter to collector. With higher number of holes recombined with electrons in base, hence, more significant difference between base current and collector current, as shown in Eq. (5). With higher magnetic field density from 100 to 400 mT, the relationship between output voltage (V_O) and magnetic field density showed higher slope, which meant higher output voltage.

Higher field density produced higher Lorentz force on the charge carriers, and as a result larger deflection angle. Some of the carriers (holes), that were normally collected by the collector, would deflect at wider angle and be collected by the base electrode. Therefore, the base current (I_B) increased, whereas the

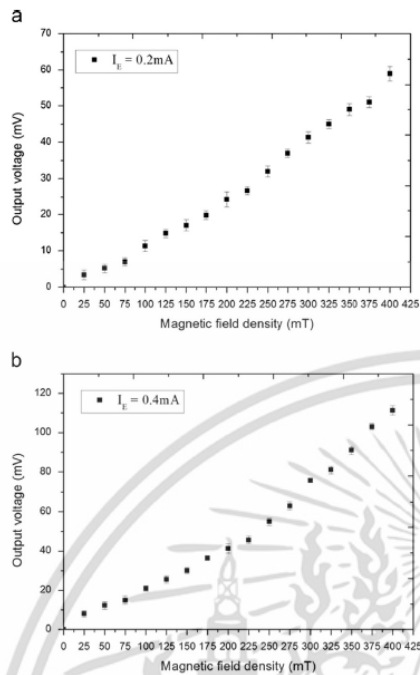


Fig. 17. The $-z$ -direction output response of a merged magnetotransistor at different biasing currents (a) $I_E = 0.2 \text{ mA}$ and (b) $I_E = 0.4 \text{ mA}$.

Table 1
The comparison of magnetic field sensitivity in B_x , B_y and B_{-z} directions with different emitter currents.

Magnetic field direction	S (%/T)	
	$I_E = 0.2 \text{ mA}$	$I_E = 0.4 \text{ mA}$
B_x	2	5.5
B_y	5	13
B_{-z}	14.5	27.7

collector current (I_C) decreased proportionally. Hence, the differential current (ΔI_{CB}) would increase accordingly. Therefore, the output voltage (V_O) would increase as a result of higher magnetic field density.

Table 1 shows the comparison between sensitivity to magnetic field strength, as calculated using Eq. (11), at different biasing currents of 0.2 and 0.4 mA in B_x , B_y and B_{-z} directions. The result shows that the sensitivity increases as a function of emitter current due to higher increase of the amount of injected carrier from emitter and also that of deflected carrier. At this stage, the sensitivity in B_x and B_y directions are not equal. Furthermore, there is still significant non-linearity caused by the asymmetric size of the base contact and collector with respect to the emitter in the structure that produces a non-uniformity distribution of the

base current, collector current and of the electric field in the device's n-region, resulting in the different carrier velocities at the edges of the emitter. The noise inside in the device itself, measurement error, and the error due to curvature of magnetic field are major non-idealities in this setup. In practice, magnetic field sensitivity in z -axis is the main use for sensing application which sensitivity on x and y axis indicated as noise for the measurement. This structure increases z -axis sensitivity up to 4 times compared to the original designs which are more suitable for most magnetic fields detect applications. The signal to noise ratio is around 7.

The merged magnetotransistor can display a linear response to the magnetic field and have relative sensitivity ranged from 2–10%/T. From previously reported work, The lateral magnetotransistor (LMT) can detect magnetic field in one direction and have sensitivity vary from 1–150%/T, such as reported by Ristic [4]. The 3D magnetic field sensors with five terminal magnetotransistor has sensitivity of 1–5%/T reported by Nagy [2] and the suppress side injection magnetotransistor (SSIMT) which has sensitivity from 1–1000%/T reported by Ristic et al. [11].

5. Conclusion

A merged magnetotransistor had an ability to detect magnetic field in x , y and z -axes using the difference in base and collector currents. The device used less than 0.5 mA of emitter biasing current. The current injection in four directions increased the sensitivity while retaining good linearity. The carrier deflection in four directions can quadruple the magnetic field sensitivity compared with the three terminal magnetotransistor. The recombination-deflection effect of merged magnetotransistor can detect lateral magnetic field by measuring the difference of carriers in opposite directions. The increase of emitter current also causes the output voltage to rise and hence enhances the sensitivity. The merged magnetotransistor can be applied in low power electronics system, but requires high sensitivity and ability to detect in multiple directions.

Acknowledgments

This work was supported by the Microelectronic Laboratory, KMUTL. One of the authors, T. Phetchakul, would like to thank the National Research Council of Thailand.

References

- [1] I. Ristic, M.T. Doan, M. Paranjape, 2-D integrated magnetic field sensor in CMOS technology, *Circuits Syst. I* (1989) 701–704.
- [2] Agnes Nagy, Hector Trujillo, 3D magnetic-field sensor using only a pair of terminals, *Sens. Actuators A58* (1997) 137–140.
- [3] R.S. Popovic, The vertical Hall-effect device, *IEEE Electron Devices Lett.* EDL-5 (1984) 357–358.
- [4] I. Ristic, T. Sny, H.P. Balkes, A lateral magnetotransistor structure with linear response to the magnetic field, *IEEE Trans. Electron Devices* ED-36 (1989) 1076–1089.
- [5] Henry P. Balkes, Integrated semiconductor magnetic field sensor, *IEEE Trans. Electron Devices* 24 (8) (1986) 315–317.
- [6] H. Trujillo, A. Nagy, J.C. Cruz, Influence of topology on the response of lateral magnetotransistor, *Sens. Actuators A45* (1994) 179–182.
- [7] T. Sny, I. Ristic, Optimization of magnetotransistor structure in CMOS technology, *IEEE Trans. Magnetic Devices* 28 (5) (1992) 2024–2030.
- [8] T. Nakamura, K. Maenaka, Integrated magnetic sensor, *Sens. Actuators A 35* (1990) 21–23.
- [9] Agnes Nagy, Hector Trujillo, Highly sensitive magnetotransistor with new topology, *Sens. Actuators A65* (1998) 97–100.
- [10] Radivoje S. Popovic, Rolf Widmer, Magnetotransistor in CMOS technology, *IEEE Trans. Electron Devices* ED-33 (9) (1986) 1334–1340.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] I.J. Ristic, H.P. Baltes, T. Smy, I. Filanovsky, Suppressed sidewall injection magnetotransistor with focus emitter injection and carrier double deflection, *IEEE Electron Devices Lett.* EDL-8 (9) (1987) 395–397.
- [12] S. Kordic, Integrated 3-D magnetic sensor based on an n-p-n transistor, *IEEE Electron Devices Lett.* EDL-7 (3) (1986) 196–198.
- [13] R.D. Tikhonov, Sensor on bipolar magnetotransistor with the base in the well, *Solid-State Electron.* 49 (2005) 1302–1308.
- [14] C.S. Roumenin, *Solid State Magnetic Sensors*, Elsevier, UK, 1994.
- [15] C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, E. Chaowicharat, C. Hruanun, A. Poyai, Magnetotransistor based on the carrier recombination-deflection effect, *IEEE Sens. J.* 10 (2) (2010) 294–299.
- [16] O. Kazakova, J.C. Gallop, P. See, D. Cox, G.K. Perkins, J.D. Moore, L.F. Cohen, Detection of a micron-sized magnetic particle using InSb Hall sensor, *IEEE Trans. Magn.* 45 (10) (2009) 4499–4502.
- [17] Jungmin Kim, Jinyi Lee, Jongwoo Jun, Minhyun Le, Changhyun Cho, Integration of Hall and giant magnetoresistive sensor arrays for real-time 2-D visualization of magnetic field vectors, *IEEE Trans. Magn.* 48 (11) (2012) 3708–3711.
- [18] P. Ripka, M. Janosek, *Advances in magnetic field sensors*, *IEEE Sens. J.* 10 (6) (2010) 1108–1116.
- [19] T. Segawa, Y. Yamaguchi, H. Hashimoto, M. Kimura, Magnetic-field line sensor using poly-Si micro Hall devices, in: *Proceedings of the 19th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (AM-FPD)*, 2012, pp. 211–212.
- [20] Young Jae Min, Chan Keun Kwon, Hoon-Ki Kim, Chulwoo Kim, Soo Won Kim, A CMOS magnetic Hall sensor using a switched biasing amplifier, *IEEE Sens. J.* 12 (5) (2012) 1195–1196.
- [21] R.D. Tikhonov, A.V. Kozlov, Yu.A. Chernova, S.A. Polomoshnov, Increase sensitivity of the sensor based on bipolar magnetotransistor by minimization initial output offset, in: *Proceedings of the International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2009, pp. 216–221.
- [22] R.D. Tikhonov, A.V. Kozlov, Krasikov A.Yu, S.A. Polomoshnov, A.G. Balashov, Bipolar magnetotransistor sensitivity dependence on temperature, in: *Proceedings of the International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2009, pp. 151–153.
- [23] A.V. Kozlov, R.D. Tikhonov, S.A. Polomoshnov, Development of planar magnetotransistor design by three-dimensional device-technological modeling, in: *Proceedings of the International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2010, pp. 208–212.
- [24] Guo-Ming Sung, Chih-Ping Yu, Two-dimensional differential folded vertical Hall device fabricated on p-type substrate using CMOS technology, *IEEE Sens. J.* 13 (99) (2013) 1.
- [25] A.S. Edelstein, J.R. Petrie, G. Sreenivasulu, G. Srinivasan, D. Viehland, Jie Fang, Magnetoelectric sensors: sensitive and potentially low-cost magnetic sensors, *IEEE Sens.* 2012 (2012) 1–3.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Proceedings of the
**14th International Symposium on
 Integrated Circuits (ISIC)**

10 – 12 Desember 2014
 Marina Bay Sands
 Singapore

Part Number : CFP1476B-ART
 ISBN : 978-1-4799-4833-8

Organised by



Technical support & inquiries

Research Publishing Services
 t: +65-6492 1137
 f: +65-6748 2556
 e: enquiries@rpsonline.com.sg

Copyright and Reprint Permission: Abstracting is permitted with credit to the source. Libraries are permitted to photocopy beyond the limit of U.S. copyright law for private use of patrons those articles in this volume that carry a code at the bottom of the first page, provided the per-copy fee indicated in the code is paid through Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923. For other copying, reprint or republication permission, write to IEEE Copyrights Manager, IEEE Operations Center, 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ 08854. All rights reserved. Copyright ©2014 by IEEE.

Mastering, IEEE compliant files & Production by:
 Research Publishing Services, email: enquiries@rpsonline.com.sg

2014 International Symposium on Integrated Circuits (ISIC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Increase Sensitivity of PNP-Magnetotransistor in CMOS Technology

Chana Leepattarapongpan, Toempong Phetchakul
Department of Electronics, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
Chana.leepattarapongpan@nectec.or.th

Puttapon Pengpad, Arckom Srihapat,
Wuthinan Jeamsaksiri, Ekalak Chaowicharat,
Charndet Hruanun and Amporn Poyai
Thai Microelectronics Center (TMEC)
National Electronics and Computer Technology Center
Chachoengsao, Thailand

Abstract—This paper presents improve sensitivity of pnp-magnetotransistor for detect vertical magnetic field response. The device structure consisted of one emitter, four collectors and four bases. The four collectors are separate to form four terminals. The same is true for the four bases. The experiment showed that, at 2 and 4mA of biasing current, magnetic field in B_z direction sensitivity within the range of 0 – 400 mT are 0.045 and 0.09 mV/mT in single mode. The sensitivity of merge mode are 0.15 and 0.3 mV/mT. The magnetic field response of merge mode shows 4-time increase of the magnetic field sensitivity comparative to single mode.

Index Terms—Magnetotransistor, HALL Effect, Lorentz force.

INTRODUCTION

The magnetotransistor based on CMOS production technology have benefited from its low power consumption, small dimensions, design flexibility and compatibility with integrated circuits assembly [1-18]. In improve sensitivity of devices; a few relevant parameters need to be considered, such as, area of injection terminal and carrier mobility. During the design of such devices, emitter area or current paths have to be reduced and redesigned for minimizing majority carriers and maximizing deflection current amplitude in order to yield higher output voltage for better sensitivity. In addition, typical silicon based semiconductor devices tend to suffer from a large temperature coefficient which can cause an offset drift problem. High temperature coefficient can have many causes including asymmetrical design, generation and recombination in substrate bulk, misalignment of photolithography processes, and nonuniformity of etching process[1-18]. These devices can then be used in various applications, for example, speed sensors, proximity sensors, and current sensors. The design of the magnetotransistor is challenging since it emphasizes ease of biasing while retaining the level of magnetic field sensitivity similar to previously reported works [9-10].

This article presents improve sensitivity of magnetotransistor with ability to sense magnetic field in B_z directions by relying on the difference between base and collector currents (ΔI_{CB}). The four emitter width of 5 μm were left to provide carrier injection paths. The device used between 1-10mA of biasing current and had good linearity.

The study experiment vertical magnetic field response of pnp-magnetotransistor compare between single and merge mode. The sensitivity on the vertical axis (B_z) can be increased by as much as 4 times of the original value. These magnetotransistor increased the device performance and accuracy, and reduced the cost of offset calibration.

STRUCTURE AND OPERATION PRINCIPLE

Figure 1(a) shows structure of the pnp-magnetotransistor consisted of emitter, four base and four collector. Both emitter and collector are p-type semiconductor, whereas base and substrate are n-type. LOCOS was fabricated as a strip around the emitter with a small opening left as the current path. The size of the opened window was the emitter width, W_E , which in this experiment having values of 5 μm . The base and collector width were both 10 μm and base width (l) were 20 μm . Figure 1(b) shows a single chip that has already been wire bonded into an IC package which embedded on PCB for practical and convenient operation.

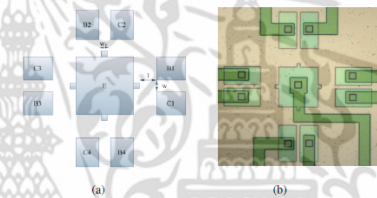


Figure 1. pnp-magnetotransistor structure (a) Top view and (b) photograph of device.

Figure 2 shows mechanism of the magnetotransistor is based on the deflection of current between two current paths, such as emitter-base and emitter-collector or other combinations (B-E and B-C or C-E and C-B), which depends on the influence of magnetic induction vector. The magnitude of the deflection current depends on the magnetic flux

intensity similar to the principal of Hall Effect. Emitter current is a combination of base and collector currents (I_B and I_C) as shown in Eq.1 and it can be derived in the form of current density as shown in Eq.2 [10].

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

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

Where J_{in} is the current density, W_E is the emitter width and d is the junction depth.

The difference between the base current and the collector current, ΔI_{CB} , as a result of magnetic induction, B_z , can cause the carrier to deviate in y direction with $\theta_{H(y)}$ angle to its original path. The relationship of ΔI_{CB} can be written as Eq. 3 with $\tan \theta_{H(y)} = \mu \cdot B_z$ [10].

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

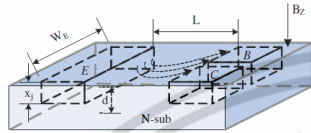


Figure 2. Mechanism of the deflection current on the device.

where

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

Substitution of Eq.4 in Eq.3 gives us equation 5 as shown.

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

where μ is carrier mobility and B_z is magnetic induction on z axis.

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

Equation 6 is a sensitivity equation where ΔB_z is a displacement of B_z

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

where ΔV is the change in base and collector current as represented by the potential difference.

Figure 3 this structure also increase the sensitivity of magnetic field detection by combining each output of four collectors and four bases into output total of device. The pnp-magnetotransistor in this article can inject carrier in four

directions. Without magnetic field, the base and collector currents will be identical ($\Delta I_{CB} = 0$) and therefore the total differential current can be express as

$$\Delta I_{CB(\text{total})} = (I_{C1} + I_{C2} + I_{C3} + I_{C4}) - (I_{B1} + I_{B2} + I_{B3} + I_{B4}) \quad (8)$$

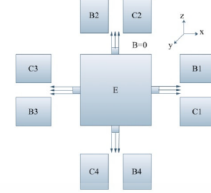


Figure 3. Carrier flow without magnetic field (B=0).

Figure 4 shows the detection of vertical magnetic field, B_z , causes carriers deflection in all four terminals. The deflected carriers will increase the base current and reduce the collector current ($\Delta I_{CB} > 0$). The ratio of this change will be the same for every collector-base pairs. The angular collector can increase the chance of carrier recombination, and hence higher base current.

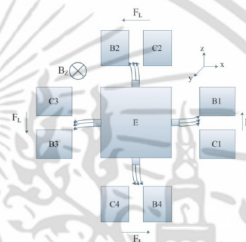


Figure 4. The directions of carrier deflection during the detection of magnetic field in z-direction.

According to the Hall Effect equation, $\tan \theta_{H} = \mu \cdot B_z$, the deflection angle will depend on magnetic field strength. This would require high level of magnetic field density in order to deflect carrier to base area. Equation (9) shows the sum of ΔI_{CB} from the four terminals. Furthermore, equation (10) shows the 4-time increase of the magnetic field sensitivity.

$$\Delta I_{CB(z)} = (\Delta I_{C1} + \Delta I_{C2} + \Delta I_{C3} + \Delta I_{C4}) - (\Delta I_{B1} + \Delta I_{B2} + \Delta I_{B3} + \Delta I_{B4}) \quad (9)$$

$$S_R = \frac{4 \cdot \Delta I_{CB}}{I_E \cdot \Delta B_z} \quad (10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FABRICATION OF PNP-MAGNETOTRANSISTOR

The fabrication of the pnp-magnetotransistor relied on CMOS fabrication process technology. An n-type silicon wafer with resistivity of 20 – 40 Ω-cm was used as a substrate. Then silicon dioxide and silicon nitride films were grown and deposited as shown in figure 5(a). With photolithography and dry etching processes helped to define openings so that thick layer of LOCOS could be grown as in figure 5(b). After another photolithography step, boron was implanted to form emitter and collector electrodes as shown in figure 5(c). Another photolithography step was required to form a base electrode with phosphorous implantation as shown in figure 5(d). After that, contact holes were formed and interconnection metal was deposited with sputtering process. After patterning the metal layer, a passivation layer was created with PECVD silicon nitride film. The final processing step was the pad opening ready for packaging. The finished device is shown in figure 5(e).

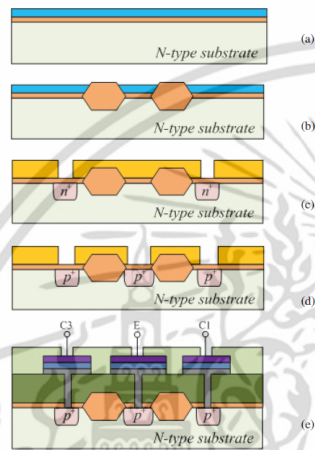


Figure 5. Process step of pnp-magnetotransistor.

RESULT AND DISCUSSION

The interface circuit used in this experiment is shown in figure 6(a)-(b). The circuit biases a pnp-magnetotransistor by forcing a constant current into emitter (I_E). The collector (C) and base (B) are connected to R_C and R_B . The output offset can be compensated by adjusting the resistors, R_C and R_B . Finally, the difference between base and collector current (ΔI_{CB}) can be shown in term of output voltage (V_O). Figure 6(a) shows interface circuit of pnp-magnetotransistor for

single mode and the interface circuit in merge mode is shown in figure 6(b). The merge mode shows the sum of voltage output (V_{Output}) from the four directions (V_{O1} , V_{O2} , V_{O3} , V_{O4}).

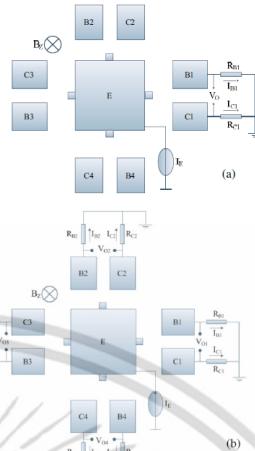


Figure 6. Interface circuit (a) single mode and (b) merge mode.

I-V Characteristics of pnp-magnetotransistor

Figure 7 shows I-V characteristic of pnp-magnetotransistor, the measured junctions of device in E-B1-C1 terminals at 1-10 mA of bias base current.

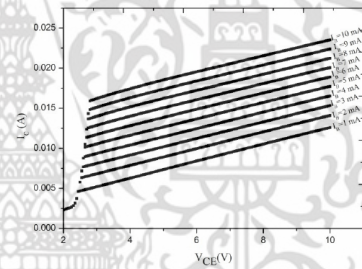


Figure 7. I-V characteristic of pnp-magnetotransistor.

The collector-emitter voltage varies from 0 to 10 mV. The pnp-magnetotransistor is similar in principle to a normal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

bipolar transistor but designed to have much longer base width ($> 10 \mu\text{m}$) to maximize the deflection of base current, and as a result, the gain (β) is low. Ideally, the recombination current (I_b) should be equal to the collector current (I_C).

Vertical magnetic field response

Figure 8 and figure 9 shows the response to magnetic field in z-direction of a pnp-magnetotransistor by varying the magnetic field density from 0 to 400 mT. The result came from a combination of carrier injection in four directions, output voltage was measured at different biasing currents of 2 and 4 mA. From the result, it shows monotonic increase of output response as a function of field density. Furthermore, for the same field density, the output voltage increases as a function of emitter current.

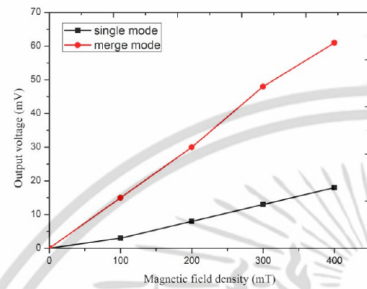


Figure 8. The z-direction output response of a pnp-magnetotransistor at emitter currents $I_e = 2\text{mA}$

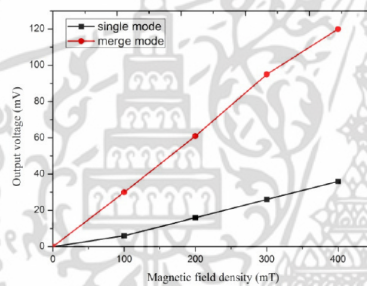


Figure 9. The z-direction output response of a pnp-magnetotransistor at emitter currents $I_e = 4\text{mA}$.

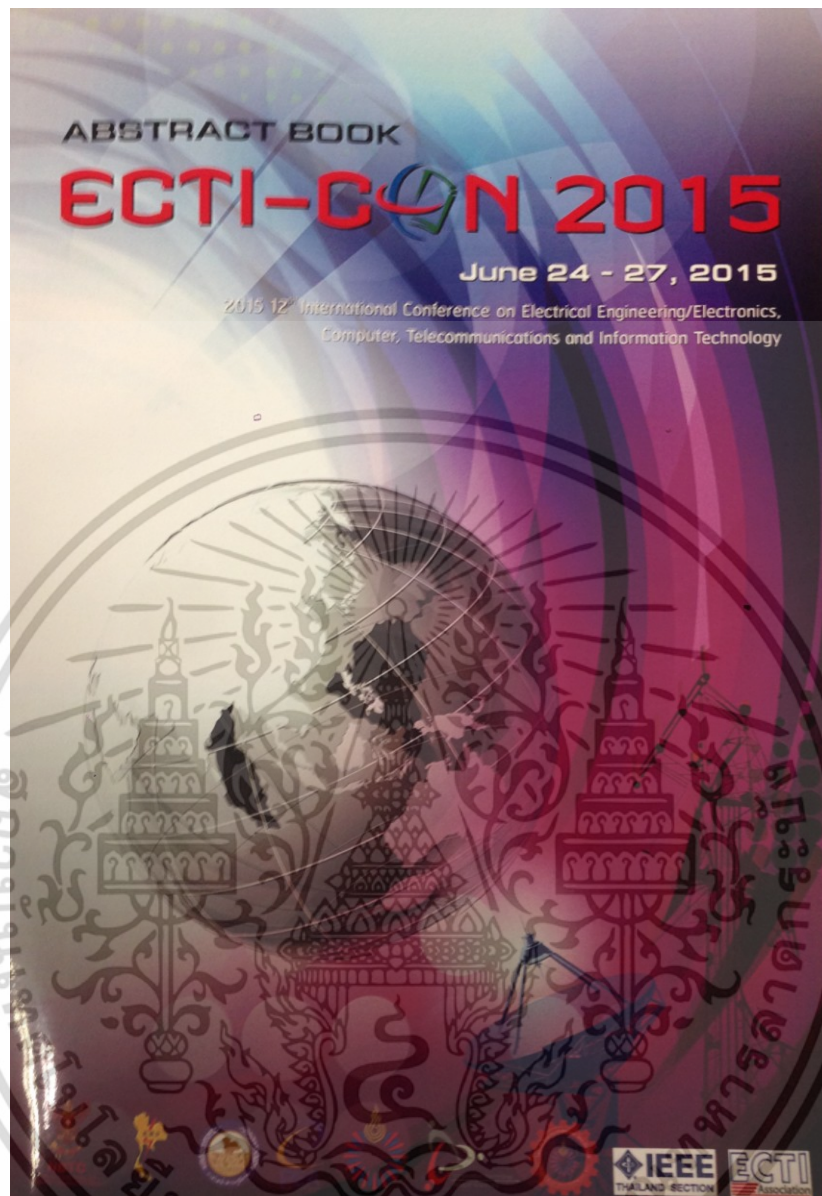
The increase of emitter current caused output voltage to rise with good linearity. Raising the magnetic field density also caused the output voltage to increase linearly as well. The magnetic field response of merge mode shows 4-time increase of the magnetic field sensitivity comparative to single mode. The magnetic sensitivity are 0.045 and 0.09 mV/mT in single mode. The sensitivity of merge mode are 0.15 and 0.3 mV/mT.

CONCLUSION

A pnp-magnetotransistor had an ability to detect magnetic field in vertical direction using the difference in base and collector currents. The current injection in four directions increased the sensitivity while retaining good linearity. The carrier deflection in four directions can quadruple the magnetic field sensitivity compared with the single mode. The increase of emitter current also causes the output voltage to rise and hence enhancing the sensitivity. The pnp-magnetotransistor can be applied in low power electronics system, but requiring high sensitivity and ability to detect in multiple directions.

REFERENCES

- [1] Lj. Ristic, M.T. Doan, M. Paranjape, "2-D integrated magnetic field sensor in CMOS technology," *Circuit Syst.*, pp. 701-704, 1989.
- [2] Agnes Nagy, Hector Trujillo, "3D magnetic-field sensor using only a pair of terminals," *Sensors and Actuators A58*, 137-140, 1997.
- [3] R.S. Popovic, "The Vertical Hall-Effect Device," *IEEE Electron Devices Lett.*, vol. EDL-5, pp.357-358, 1984.
- [4] Lj. Ristic, T. Smy, H.P. Bates, "A lateral magnetotransistor structure with linear response to the magnetic field," *IEEE Trans. Electron. Dev.*, ED-36, 1076-1089, 1989.
- [5] Henry P. Bates, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor," *IEEE Trans. Electron Device.*, vol. 74, pp. 315-317, no. 8, 1986.
- [6] H. Trujillo, A. Nagy and J.C. Cruz, "Influence of topology on the response of lateral magnetotransistor," *Sensors and Actuators A45*, pp. 179-182, 1994.
- [7] T. Smy and Lj. Ristic, "Optimization of Magnetotransistor Structure in CMOS Technology," *IEEE Trans. Magnetic. Dev.*, vol 28, no. 5, 2024-2030, 1992.
- [8] T. Nakamura and K. Maenaka, "Integrated Magnetic Sensor," *Sensors and Actuators A.*, vol.35, pp.21-23, 1990.
- [9] Agnes Nagy and Hector Trujillo, "Highly sensitive magnetotransistor with new topology," *Sensors and Actuators A65*, pp. 97-100, 1998.
- [10] C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondue, P. Pengpad, E. Chaowicharat, C. Hruanun and A. Poyai, "Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination - Deflection Effect", *IEEE Sensor Journal*, Vol.10, no.2, pp. 294-299, 2010.
- [11] Radivoje S. Popovic and Rolf Widmer, "Magnetotransistor in CMOS Technology," *IEEE Trans. Electron. Dev.*, ED-33, no. 9, pp. 1334-1340, 1986.
- [12] Lj. Ristic, H.P. Bates, T. Smy and I. Filanovsky, "Suppressed Sidewall Injection Magnetotransistor with focus Emitter Injection and Carrier Double Deflection," *IEEE Electron Devices Lett.*, EDL-8, no. 9, pp.395-397, 1987.
- [13] S. Korcic, "Integrated 3-D Magnetic Sensor Based on an n-p-n Transistor," *IEEE Electron Devices Lett.*, EDL-7, no. 3, pp. 196-198, 1986.
- [14] R.D. Tikhonov, "Sensor on Bipolar Magnetotransistor with the Base in the well," *Solid State Electronic.*, vol.49, pp. 1302-1308, 2005.
- [15] C.S. Roumenin, "Solid State Magnetic Sensors," *Elsevier*, 1994.
- [16] C.S. Roumenin, "Microsensors for magnetic fields," *Elsevier*, 1994.
- [17] Eds. J. Korvink and O. Paul, "MEMS-a practical guide to design, analysis and applications," *William Andrew Publication*, pp. 453-521, 2006.
- [18] H. Trujillo and A. Nagy, "Lateral bipolar magnetotransistor's offset compensation through their common mode response," *Sensors and Actuators A100*, pp. 32-36, 2002.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Magnetotransistor for 2-Axis Magnetic Field Measurement in CMOS Technology

Chana Leepattarapongpan, Toempong Phetchakul
Department of Electronics, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
Chana.leepattarapongpan@nectec.or.th

Puttapon Pengpad, Arkom Srihapat,
Wutthinan Jeamsaksiri, Ekalak Chaowicharat
Charndet Hruanun and Amporn Poyai
Thai Microelectronics Center (TMEC)
National Electronics and Computer Technology Center
Chachoengsao, Thailand

Abstract—This paper presents a magnetotransistor for detecting magnetic field in vertical and lateral directions (B_y and B_z) by relying on the difference between base and collector currents (ΔI_{CB}). It was designed and fabricated using CMOS fabrication technology. The device structure consisted of one emitter, 4 collectors and 4 bases. The experiment showed that, at 10 mA of biasing current, the B_y and B_z direction sensitivity to magnetic field within the range of 0 – 400 mT are 0.7 and 1.35 %/T, respectively. The sensitivity at emitter current 20mA are 0.55 and 0.7 %/T for vertical and lateral magnetic field directions, respectively. This research on the magnetotransistor produced magnetic sensors with small size, high performance with wide range of applications.

Keywords—Magnetotransistor, HALL Effect, Lorentz force.

I. INTRODUCTION

The magnetotransistor based on CMOS production technology have benefited from its low power consumption, small dimensions, design flexibility and compatibility with integrated circuits assembly [1-18]. To improve sensitivity of devices, a few relevant parameters need to be considered, such as, area of injection terminal and carrier mobility. During the design of such devices, emitter area or current paths have to be reduced and redesigned for minimizing majority carriers and maximizing deflection current amplitude in order to yield higher output voltage for better sensitivity. In addition, typical silicon based semiconductor devices tend to suffer from a large temperature coefficient which can cause an offset drift problem. High temperature coefficient can have many causes including asymmetrical design, generation and recombination in substrate bulk, misalignment of photolithography processes, and nonuniformity of etching process[1-18]. These devices can then be used in various applications, for example, speed sensors, proximity sensors, and current sensors. The design of the magnetotransistor is challenging since it emphasizes ease of biasing while retaining the level of magnetic field sensitivity similar to previously reported works [9-10].

This article presents magnetotransistor with ability to sense magnetic field in vertical and lateral directions by relying on the difference between base and collector currents (ΔI_{CB}). The

four emitters width of 5 μm were left to provide carrier injection paths. The experiment study vertical and lateral magnetic field response of magnetotransistor between device A and device B. The sensitivity on the vertical axis (B_z) can be increased by as much as 2 times of the single device. These magnetotransistors increased the device performance and accuracy, and reduced the cost of offset calibration.

II. STRUCTURE AND OPERATION PRINCIPLE

Fig. 1(a) shows structure of the magnetotransistor consisted of emitter, four bases and four collectors. Both emitter and collector are p-type semiconductor, whereas base and substrate are n-type. LOCOS was fabricated as a strip around the emitter width a small opening lefted as the current path. The size of the opened window was the emitter width, W_E , which in this experiment having values of 5 μm . The base and collector width were both 10 μm and base width (l) were 20 μm . Figure 1(b) shows a single chip that has already has been wire bonded into on IC package which embedded on PCB for practical and convenient operation.

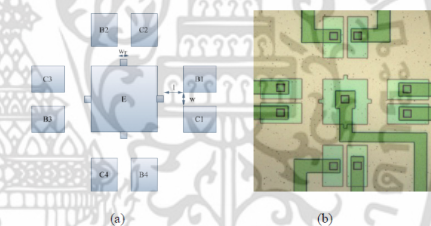


Figure 1. Magnetotransistor structure (a) Top view and (b) photograph of device.

Fig. 2 shows mechanism of the magnetotransistor based on the deflection of current between two current paths, such as emitter-base and emitter-collector or other combinations (B-E and B-C or C-E and C-B), which depends on the influence of magnetic induction vector. The magnitude of the deflection

current depends on the magnetic flux intensity similar to the principal of Hall Effect. Emitter current is a combination of base and collector currents (I_B and I_C) as shown in Eq.1 and it can be derived in the form of current density as shown in Eq.2 [10].

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

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

where J_{ix} is the current density, W_E is the emitter width and d is the junction depth.

The difference between the base current and the collector current, ΔI_{CB} , as a result of magnetic induction, B_Z , can cause the carrier to deviate in y direction with $\theta_{H(y)}$ angle to its original path. The relationship of ΔI_{CB} can be written as Eq. 3 with $\tan \theta_{H(y)} = \mu \cdot B_Z$ [10].

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

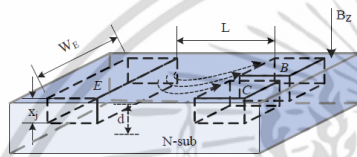


Figure 2. Mechanism of the deflection current on the device.

where

$$\Delta W_E = \Delta Y = \mu \cdot L \cdot B_Z \quad (4)$$

Substitution of Eq.4 in Eq.3 gives us equation 5 as shown.

$$\Delta I_{CB(y)} = J_{ix} \cdot d \cdot L \cdot \mu \cdot B_Z \quad (5)$$

where μ is carrier mobility and B_Z is magnetic induction on z axis.

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

Equation 6 is a sensitivity equation where ΔB_Z is a displacement of B_Z

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

where ΔV is the change in base and collector current as represented by the potential difference.

Fig. 3 shows the response to magnetic field in lateral direction (B_Y) and holes current in $+x$ direction. Therefore, the resulting Lorentz force and holes deflection will be in $-z$

direction. The equivalent carrier deflection area for an analytical model of the changing base current and collector current due to recombination-deflection of the lateral direction can be calculated by integrating the current density J_{px} in the lateral plane with the area defined by $\Delta Z \cdot W_E$ in (4). The movement of charge carriers in z -axis causes the change in angle $\theta_{H(z)}$ with ΔZ change.

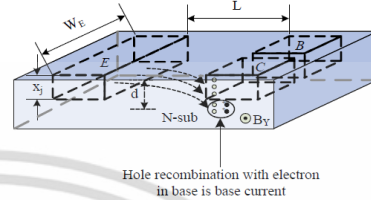


Figure 3. Carrier deflection (holes) in response to lateral magnetic field.

The equation shows the relationship of ΔI_{CB} , for detecting the lateral magnetic field as presented in (8), and the difference in collector and base currents.

$$\Delta I_{CB(z)} = J_{px} \cdot W_E \cdot \Delta d \quad (8)$$

$$\text{where } \Delta d = \Delta Z = \mu \cdot L \cdot B_Y \quad (9)$$

using (8) and (9) obtain for $\Delta I_{CB(z)}$

$$\Delta I_{CB(z)} = J_{px} \cdot W_E \cdot L \cdot \mu \cdot B_Y \quad (10)$$

where L is the distance from the emitter to base and collector terminals (base width).

III. RESULT AND DISCUSSION

The interface circuit used in this experiment is shown in figure 4. The circuit biases a magnetotransistor by forcing a constant current into emitter (I_E). The collector (C) and base (B) are connected to R_C and R_B . The output offset can be compensated by adjusting the resistors, R_C and R_B . Finally, the difference between base and collector current (ΔI_{CB}) can be measured at each terminal of device A and device B.

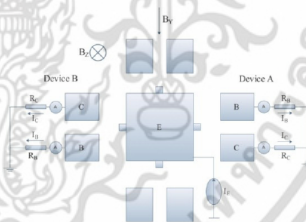


Figure 4. Interface circuit of magnetotransistor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A. Vertical magnetic field response

Fig. 5 and 6 shows the vertical magnetic field response of magnetotransistor by varying the magnetic field density from 0 to 400 mT. The result came from calculating the difference between base and collector current in 4 terminal at device A and B. The output current was measured at different biasing currents of 10 mA and 20 mA. From the result, it shows monotonic increase of output response as a function of field density. Furthermore, for the same field density, the output current did not increase as a function of emitter current.

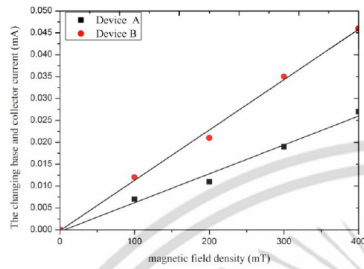


Figure 5. The vertical magnetic field output response of magnetotransistor at emitter currents $I_e = 10\text{mA}$

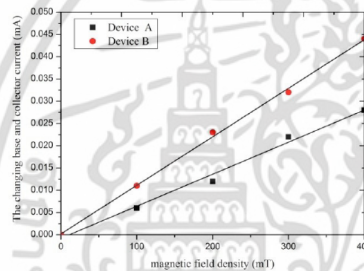


Figure 6. The vertical magnetic field output response of magnetotransistor at emitter currents $I_e = 20\text{mA}$

The detection of vertical magnetic field, B_z , causes carriers deflection in both terminals. The deflected carriers will increase the base current and reduce the collector current ($\Delta I_{CB} > 0$). The ratio of this change will be the same for every collector-base pairs. The angular collector can increase the chance of carrier recombination, and hence higher base current. The output current of device A is similar to device B, it shows output current increasing as a function of magnetic field density and not as a function of emitter current.

B. Lateral magnetic field response

Fig. 7 and 8 show the lateral magnetic field response of magnetotransistor. The measurement was performed similarly to the previous case. Raising the magnetic field strength also caused the output current to increase linearly as well.

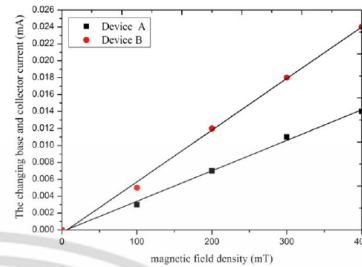


Figure 7. The lateral magnetic field output response of magnetotransistor at emitter currents $I_e = 10\text{mA}$

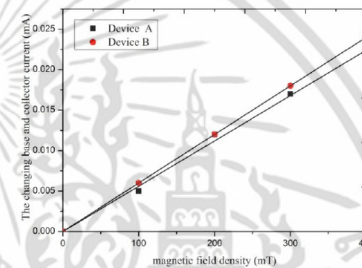


Figure 8. The lateral magnetic field output response of magnetotransistor at emitter currents $I_e = 20\text{mA}$

The mechanism in the lateral direction (B_y) of magnetotransistor is the change in current occurring at base and collector terminals. The hole carriers at base-collector of device A will deflect in Z-direction and then recombine with electrons in the substrate, which is the same type as base, to become base current I_B and lower collector current I_C . Meanwhile the -X-direction carriers at base-collector terminal of device B will deflect in +Z-direction causing higher base current I_B and lower collector current I_C . However, the ratio of this change will not be the same as device A. The difference is caused by the asymmetric and recombination - deflection effect of magnetotransistor having the same doping type between base and substrate. Table I shows the comparison between sensitivity to magnetic field density, as calculated using equation (6), at different biasing currents of 10 and 20

mA in B_Y and B_Z directions. Magnetic detection sensitivity on device A and B are comparable and independent of emitter biasing current.

TABLE I. The Comparison of magnetic field sensitivity in B_Y and B_Z directions with different emitter currents

Magnetic field direction	S (%/T)	
	$I_E = 10$ mA	$I_E = 20$ mA
B_Z (device A)	1.35	0.7
B_Z (device B)	3	1.1
B_Y (device A)	0.7	0.55
B_Y (device B)	1.2	0.6

IV. CONCLUSION

A magnetotransistor had an ability to detect magnetic field in vertical and lateral directions using the difference in base and collector currents. Output current of device A and B increase linearly to the magnetic field. Symmetry between device A and B gives equality in sensitivity for both devices whereas effect of output current change has no influence on the sensitivity. The magnetotransistor can be applied to detect in multiple directions and high performance with wide range applications.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Thai Microelectronic Center and the Electronic Research Center, KMITL. One of the authors, T. Phetchakul, would like to thank Thailand Research Fund.

REFERENCES

- [1] Lj. Ristic, M.T. Doan, M. Paranjape, "2-D integrated magnetic field sensor in CMOS technology," *Circuit Syst.*, pp. 701-704, 1989.
- [2] Agnes Nagy, Hector Trujillo, "3D magnetic-field sensor using only a pair of terminals," *Sensors and Actuators A38*, 137-140, 1997.
- [3] R.S. Popovic, "The Vertical Hall-Effect Device," *IEEE Electron Devices Lett.*, vol. EDL-5, pp.357-358, 1984.
- [4] Lj. Ristic, T. Smy, H.P. Baltes, "A lateral magnetotransistor structure with linear response to the magnetic field," *IEEE Trans. Electron. Dev.*, ED-36, 1076-1089, 1989.
- [5] Henry P. Baltes, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor," *IEEE Trans. Electron Device.*, vol. 74, pp. 315-317, no. 8, 1986.
- [6] H. Trujillo, A. Nagy and J.C. Cruz, "Influence of topology on the response of lateral magnetotransistor," *Sensors and Actuators A43*, pp. 179-182, 1994.
- [7] T. Smy and Lj. Ristic, "Optimization of Magnetotransistor Structure in CMOS Technology," *IEEE Trans. Magnetic. Dev.*, vol 28, no. 5, 2024-2030, 1992.

- [8] T. Nakamura and K. Maenaka, "Integrated Magnetic Sensor," *Sensors and Actuators A*, vol.35, pp.21-23, 1990.
- [9] Agnes Nagy and Hector Trujillo, "Highly sensitive magnetotransistor with new topology," *Sensors and Actuators A65*, pp. 97-100, 1998.
- [10] C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, E. Chaowicharat, C. Hruanun and A. Poyai, "Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination - Deflection Effect", *IEEE Sensor Journal*, Vol.10, no.2, pp. 294-299, 2010.
- [11] Radivoje S. Popovic and Rolf Widmer, "Magnetotransistor in CMOS Technology," *IEEE Trans. Electron. Dev.*, ED-33, no. 9, pp. 1334-1340, 1986.
- [12] Lj. Ristic, H.P. Baltes, T. Smy and I. Filanovsky, "Suppressed Sidewall Injection Magnetotransistor with focus Emitter Injection and Carrier Double Deflection," *IEEE Electron Devices Lett.*, EDL-8, no. 9, pp.395-397, 1987.
- [13] S. Kordic, "Integrated 3-D Magnetic Sensor Based on an n-p-n Transistor," *IEEE Electron Devices Lett.*, EDL-7, no. 3, pp. 196-198, 1986.
- [14] R.D. Tikhonov, "Sensor on Bipolar Magnetotransistor with the Base in the well," *Solid-State Electronic.*, vol 49, pp. 1302-1308, 2005.
- [15] C.S. Roumenin, "Solid State Magnetic Sensors," *Elsevier*, 1994.
- [16] C.S. Roumenin, "Microsensors for magnetic fields," *Elsevier*, 1994.
- [17] Eds. J. Korvink and O. Paul, "MEMS-a practical guide to design, analysis and applications," *William Andrew Publication.*, pp. 453-521, 2006.
- [18] H. Trujillo and A. Nagy, "Lateral bipolar magnetotransistor's offset compensation through their common mode response," *Sensors and Actuators A100*, pp. 32-36, 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Available online at www.sciencedirect.com

Procedia Engineering 00 (2011) 000–000

**Procedia
Engineering**

www.elsevier.com/locate/procedia

Proc. EuroSensors XXV, September 4-7, 2011, Athens, Greece

The Effect Injection Width and Temperature-Offset Compensation of Magnetotransistor

Chana Leepattarapongpan^{a,b,*}, Toempong Phetchakul^b, Naritchaphan Penpondee^b,
Puttapon Pengpad^a, Arckom Srihapat^a, Wuthinan Jeamsaksiri^a
Chamdet Hruanun^a and Ampom Poyai^a

^aThai Microelectronics Center (TMEC), National Electronics and Computer Technology Center, Chachoengsao, Thailand
^bDepartment of Electronics, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Abstract

This paper presents effect of injection width on Magnetotransistor. Emitter area was confined by LOCOS and the injection window size was varied from 4, 5 to 10 microns. With bias current of 3 mA the window size 4 micron gives best sensitivity at 10mV/T. Measurement linearity is 0.1 % full scale. voltage gain of 10 was used for minimizing temperature coefficient to be around 7.9 mV/°C measured from 25 to 125 °C. Temperature coefficient divided by sensitivity give us a relative temperature sensitivity of 7.9 % T/°C. Second magnetic sensor device has been used for temperature compensation. The second device was config as magnetic field immune then it was used as a temperature offset voltage reference. The added module reduces overall temperature sensitivity down to 0.3 % T/°C.

© 2011 Published by Elsevier Ltd.

Keywords: Magnetotransistor; Injection width; Hall Effect; Temperature-offset compensation

1. Introduction

Magnetotransistor based on CMOS production technology are joyfully benefits from its low power consumption, small dimension, design flexibility and compatible with integrated circuits assemble. Considering low power device a few effect parameters need to be concerned such as area of injection terminal and carrier mobility. In the design case emitter area or current path have to be reduced and

* Chana Leepattarapongpan. Tel.: +66-038-857100-9; fax: +66-038-857175-6.
E-mail address: chana.leepattarapongpan@nectec.or.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

redesigned for minimizing majority carriers and maximizing deflection current amplitude to yield higher output voltage for better sensitivity. Typically silicon based semiconductor devices are suffering from a large temperature coefficient which can cause operation off-set drift problem. High temperature coefficient comes from many reasons involving insymmetrical design, generation and recombination in substrate bulk, misalignment of photolithography processes and non-uniform of etching process. Temperature compensation and calibration is recommended at operating temperature if one expect accuracy from this type of sensing devices.

This paper presents low power magnetotransistor sensing both vertical and lateral magnetic field vectors based on Hall effect principle. Detail studies on the relationship between emitter width and power consumption have been done and the thermal offset drift compensation method has been accomplished by the dual magnetotransistor compensation technique. These methods increase the device performance, accuracy and reduce cost on offset calibration.

2. Structure and Operation principle

Figure 1(a) shows structure of the magnetotransistor consisted of emitter, base and collector. Both emitter and collector are p type semiconductor where base and substrate are n type semiconductor. LOCOS was fabricated as a strip around the emitter where it was left open as the current path. The dimension of the opened window is referred as the emitter width, W_E , which is varied from 4, 5 to 10 microns. The base width and the collector width referred from their contact sizes are 10 microns and the distance between the base and the collector is 20 microns.

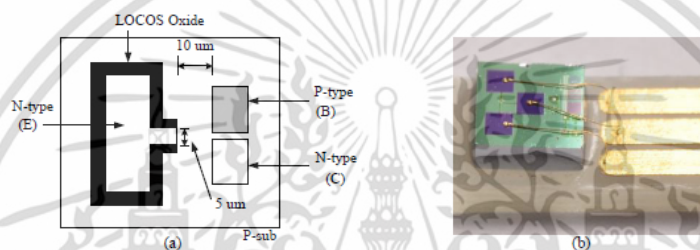


Fig. 1 (a) Structure of the magnetotransistor and (b) Micrograph of device fabricated

Mechanism of the magnetotransistor is based on deflection current between two current paths, such as emitter-base and emitter-collector or other combinations (B-E and B-C or C-E and C-B), which are on influence of magnetic induction vector. The magnitude of the deflection current depended on magnetic flux intensity similar to the principal of Hall Effect. Emitter current is a combination of base and collector currents (I_B and I_C) as shown in equation 1 and it can be derived in form of current density as shown in eq.2 [2-3].

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

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

Where J_{nx} is the current density, W_E is the emitter width and d is the junction depth.

The difference between the base current and the collector current, ΔI_{CB} , as a result of magnetic induction, B_z , can cause the carrier deviates in y axis with $\theta_{H(y)}$ angle compared to its original path. The relation of ΔI_{CB} can be written as equation 3 and $\tan \theta_{H(y)} = \mu \cdot B_z$ [2-3].

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Result and Discussion

3.1. The effect injection width

Figure 2 shows a relation between output voltage and magnetic induction flux along with the emitter width variation. The magnetic induction was varied from 0 to 0.4 mT. The slopes represent sensitivities compared three conditions of emitter width (4, 5 and 10 microns). As can be seen from the figure smaller size of the emitter width helps improving sensitivity of the device. At emitter width of 4 microns, the sensitivity increase by 3% compared with the condition of 10 microns width. This results confirm benefit of LOCOS which also reduces leakage current around the emitter to gain more energy efficiency and increases the sensitivity of the device.

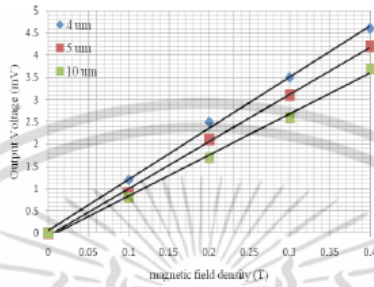


Fig. 2 The relation between magnetic field density and output voltage at emitter width

3.2. The Temperature-offset compensation

Magnetotransistor is a bipolar transistor with two p-n junctions as basic fundamental. The p-n junction plays an important role on temperature dependence of the device derived as a built-in voltage (V_{bi}) at the junction. The temperature also effects carrier mobility so the output signal offset as shown in Eq.4.

$$V_{offset} = V_{\mu(T)} + V_{bi} \tag{4}$$

The Graph shown relationship between temperature and output voltage of the sensing device at zero magnetic induction is presented in figure 3(a). Temperature was ramp up from room temperature to 125 °C which give the device's temperature coefficient of 7.9mV/ °C. Figure 3(b) shows forward I-V characteristic curves of the both diodes (B-C and B-E) at temperature of 40, 70 and 100 °C which are temperature dependence as same as in reverse bias regime.

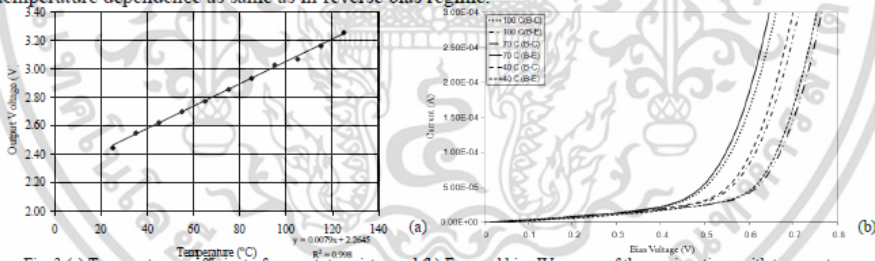


Fig. 3 (a) Temperature coefficient of magnetotransistor and (b) Forward bias IV curves of the p-n junctions with temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This high temperature coefficient need to be compensated to improve the device's measuring accuracy. Therefore the double magnetotransistor configuration has been used to solve this problem by using another magnetotransistor with canceling its ability of sensing magnetic field out but still keep its temperature response behaviour. The diagram in figure 4(a) shows this configuration combining the magnetotransistor configured as measurement mode (MT2) with the temperature mode (MT1). The experimental results in figure 4(b) also confirm this method. The graph show two plots of magnetotransistor in measurement mode vs temperature mode and compensated output signal at zero magnetic field applied. The compensated signal shows a good result with only 1.1% deviation from zero magnetic field off-set voltage over the temperature range of 25-125 °C.

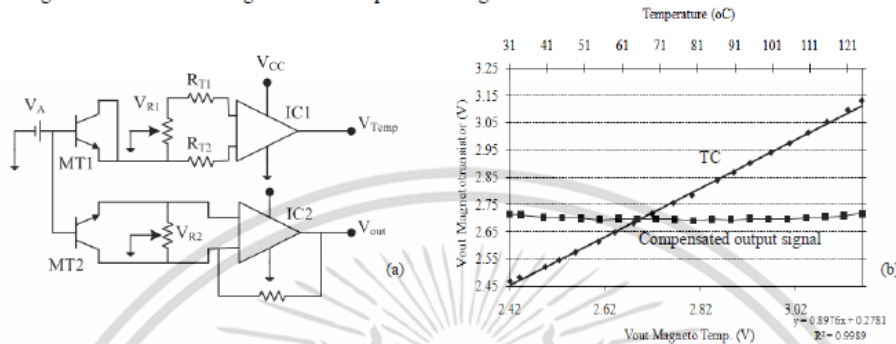


Fig. 4 (a) Dual magnetotransistor configuration and (b) Output signal of temperature compensated terminal and output signal

Conclusion

The experimental results inform that reduction emitter width of the magnetotransistor help improving the device sensitivity about 3% from 10 to 4 microns width. The dual magnetotransistor configuration technique reduces temperature coefficient from its original value of 7.9 mV/°C to 0.3 mV/°C over the temperature range of 25-125 °C accounted for 1.1% deviation from zero magnetic field off-set voltage.

Acknowledgements

This research was supported by the Thai microelectronics center (TMEC) as part of National electronics and computer technology center (NECTEC).

References

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Low Power 3D-Magnetotransistor Based on CMOS Technology

Chana Leepattarapongpan^{1,2}, Toempong Phetchakul², Naritchaphan Penpondee¹, Puttapon Pengpad¹, Arckom Srihatip¹, Ekalak Chaowicharat¹, Charndet Hruanun^{*} and Amporn Poyai¹

¹Thai Microelectronics Center, National Electronics and Computer Technology Center, Chachoengsao, Thailand.
Email: chana.leepattarapongpan@nectec.or.th

²Department of Electronic, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

Abstract—This article presents a 3D magnetotransistor for detecting magnetic field in three dimensions (B_x , B_y , and B_z) by relying on the difference between base and collector currents (ΔI_{CB}). This device used low biasing current. It was designed and fabricated using CMOS fabrication technology. The device structure consisted of one emitter, 4 collectors and 4 bases. LOCOS oxide was grown to surround the emitter area to limit lateral carrier loss, and therefore reducing the overall biasing current. The experiment showed that, at 0.2 mA of biasing current, the B_x , B_y and B_z direction sensitivity to magnetic field within the range of 0 – 400 mT are 0.05, 0.07 and 0.145 mV/mT, respectively.

I. INTRODUCTION

Typically, magnetic sensors based on Hall sensors, Magnetodiode, Magnetotransistor, and MAGFET structures can only sense magnetic field in one direction which can either be parallel or perpendicular to the chip surface. As a result, there is a need for magnetic sensors that can sense magnetic field in two or three directions with high sensitivity and low biasing current or voltage[1-15]. To develop these magnetotransistors with the above properties, the design relied on following strategies[1-9].

1. The quantity of deflected carriers by Lorentz force represent the fact that carrier recombination rate and deflected carrier rate are changing in opposite directions.
2. The movement of majority carriers in the emitter have to be in a single direction. Furthermore, the deflection has to also be in a single direction.

In this research, the sensitivity of magnetotransistors in relation with emitter current and magnetic field strength can be shown in equation (1).

$$S_R = \frac{\Delta I_{CB}}{I_E \cdot \Delta B_Z} \quad (1)$$

Where, ΔI_{CB} is the difference between base and collector currents, I_E is the biasing current of emitter and B is magnetic field density.

This article presents a magnetotransistor with ability to sense magnetic field in B_x , B_y , and B_z directions by relying on the difference between base and collector currents. The device used less than 1 mA of biasing current and had good linearity. It can be used in many applications such as current sensors and proximity sensors.

II. STRUCTURE AND OPERATING PRINCIPLE

A. Structure of a 3D-magnetotransistor

The structure of a low power 3D magnetotransistor is presented in figure 1. This device was a PNP structure with emitter and collectors made from boron (p-type) and the base area was made from phosphorus (n-type). The whole device was fabricated on an n-type substrate. The structure consisted of one emitter, four collectors and four bases. LOCOS oxide structures were thermally grown to surround the emitter area. The four emitter width of 5 μm were left to provide carrier injection paths. The space between the emitter and collectors (base width) was 20 μm . Each collector was designed to have one side making 45 degree angle to the carrier movement path, as shown in figure 1(a). Figure 1(b) shows a magnetotransistor after packaging on a printed circuit board.

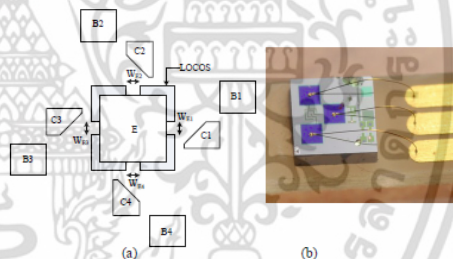


Figure 1. Magnetotransistor structure (a) Top view and (b) packaged device.

B. Operating principle

The operating principle of a magnetotransistor is based on Hall Effect. The deflection of carriers due to Lorentz force, while passing through magnetic field, creates the difference between base and collector currents, ΔI_{CB} [15]. The biasing current at an emitter can be shown in equation (2),

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

where, J_{pk} is the current density along x-axis, d is the effective depth of the current and W_E is emitter width.

The difference between base and collector current for vertical magnetic field detection can be calculated using equation (3)[15]. In addition, the current difference for lateral magnetic field detection can be found using equation (4)[15].

$$\Delta I_{CB(v)} = J_{pk} \cdot d \cdot L \cdot \mu \cdot B_Z \quad (3)$$

where, μ is hole mobility and B_Z is magnetic field density in z-axis.

$$\Delta I_{CB(l)} = J_{pk} \cdot W_E \cdot L \cdot \mu \cdot B_Y \quad (4)$$

where, L is the length of emitter to base and collector terminals (base width).

The magnetotransistor in this article can inject carriers in four directions and therefore the total differential current can be calculate as following equation (5),

$$\Delta I_{CB(\text{total})} = \Delta I_{CB(1)} + \Delta I_{CB(2)} + \Delta I_{CB(3)} + \Delta I_{CB(4)} \quad (5)$$

C. Lateral magnetic field: B_X

The detection of lateral magnetic field, B_X , causes Lorentz force in the Y-direction. The carriers deflection will occur at B(1) – C(1) and B(3) – C(3) terminals. Figure 2 shows the carrier movement directions.

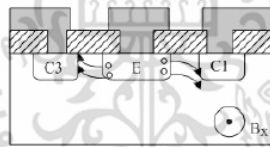


Figure 2. The directions of carrier deflection during the detection of magnetic field in X-direction.

Equation 6 shows the relationship for magnetic field detection in B_X direction.

$$\Delta I_{CB(x)} = \Delta I_{CB(1)} + \Delta I_{CB(3)} \quad (6)$$

D. Lateral magnetic field: B_Y

The detection of lateral magnetic field, B_Y , causes carriers deflection to occur at B(2) – C(2) and B(4) – C(4) terminals. Figure 3 shows the carrier movement directions. Equation 7 shows the relationship for magnetic field detection in B_Y direction.

$$\Delta I_{CB(y)} = \Delta I_{CB(1)} + \Delta I_{CB(3)} \quad (7)$$

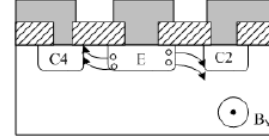


Figure 3. The directions of carrier deflection during the detection of magnetic field in Y direction.

E. Vertical magnetic field: B_Z

Figure 4 shows the detection of vertical magnetic field, B_Z , causes carriers deflection in all four terminals. Equation (8) shows the sum of ΔI_{CB} from the four terminals. Furthermore, equation (9) shows the 4-time increase of the magnetic field sensitivity.

$$\Delta I_{CB(z)} = \Delta I_{CB(1)} + \Delta I_{CB(2)} + \Delta I_{CB(3)} + \Delta I_{CB(4)} \quad (8)$$

$$S_R = \frac{4 \cdot \Delta I_{CB}}{I_E \cdot \Delta B_Z} \quad (9)$$

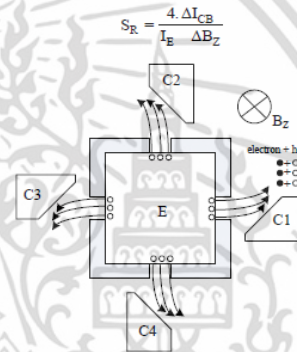


Figure 4. The directions of carrier deflection during the detection of magnetic field in Z-direction.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Interface Circuit

The interface circuit used in this experiment is shown in figure 5. The circuit biases a magnetotransistor by forcing a constant current into emitter (I_E). The collector (C) and base (Ba) are connected to R_C and R_B . The input offset can be compensated by adjusting the resistors, R_C and R_B . Finally, the difference between base and collector current (ΔI_{CB}) can be shown in term of output voltage (V_O).

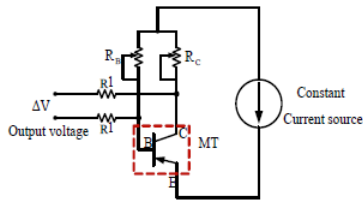


Figure 5. Interface circuit.

B. The effect of 45° collectors

Figure 6(a) shows the original design having the carrier accepting side perpendicular to the carrier path. According to the Hall Effect equation, $\tan \theta_H = \mu \cdot B_z$, the deflection angle will depend on magnetic field strength. This would require high level of magnetic field strength in order to deflect carrier to base area.

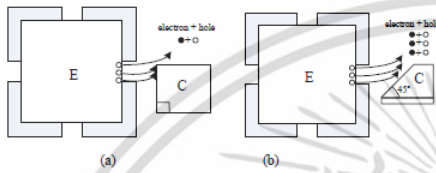


Figure 6. The deflected carrier movement for collector angles at 45° and 90°.

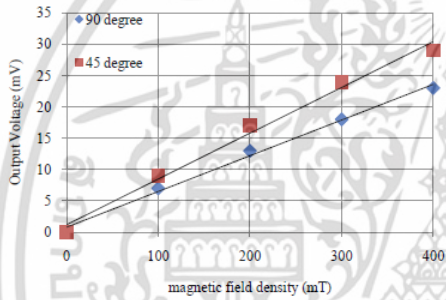


Figure 7. The relationship between magnetic field strength and output voltage between collector angles at 45° and 90°.

C. Response to magnetic field in X-direction

Figure 8 shows the response to magnetic field in X-direction of a 3D magnetotransistor by varying the magnetic field density from 0 to 400 mT. The output voltage was measured at different biasing currents of 0.2 and 0.4 mA.

linearity. Raising the magnetic field strength also caused the output voltage to increase linearly as well.

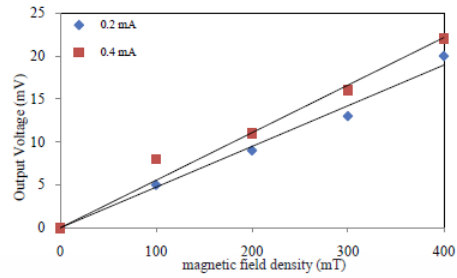


Figure 8. The X-direction output response of a 3D magnetotransistor at different biasing currents.

D. Response to magnetic field in Y-direction

Figure 9 shows the response to magnetic field in Y-direction of a 3D magnetotransistor. The measurement was performed similarly to the previous case. The increase of emitter current caused output voltage to rise with good

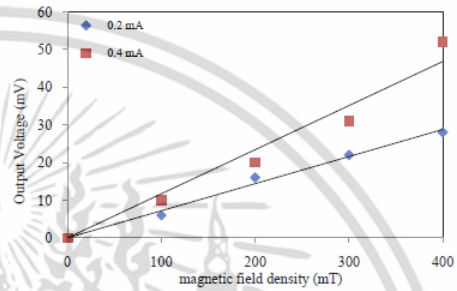


Figure 9. The Y-direction output response of a 3D magnetotransistor at different biasing currents.

E. Response to magnetic field in Z-direction

Figure 10 shows a relationship between Z-direction magnetic field strength and the output voltage of a 3D magnetotransistor. The result came from a combination of carrier injection in four directions, and as a result, the output voltage was higher than the case of X-direction or Y-direction separately.

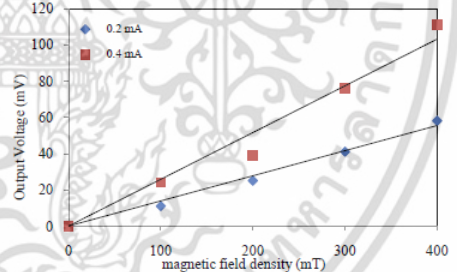


Figure 10. The Z-direction output response of a 3D magnetotransistor at different biasing currents.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1 shows the comparison between sensitivity to magnetic field strength, as calculated using equation 6, at different biasing currents of 0.2 and 0.4 mA in B_X , B_Y and B_Z directions.

TABLE I. Comparison of magnetic field sensitivity in X, Y, and Z directions with different emitter currents.

Emitter current (mA)	Sensitivity (mV/mT)		
	B_X	B_Y	B_Z
0.2	0.05	0.07	0.145
0.4	0.055	0.13	0.277

IV. CONCLUSION

A new 3D magnetotransistor had an ability to detect magnetic field in X, Y, and Z directions using the difference in base and collector currents. The device used less than 1 mA of emitter biasing current. The current injection in four directions increased the sensitivity while retaining good linearity. This device can be applied in a system where power needed to be

ACKNOWLEDGMENT

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

REFERENCES

- [1] Lj. Ristic, M.T. Doan, M. Paranjape, "2-D integrated magnetic field sensor in CMOS technology," *Circuit Syst.*, pp. 701-704, 1989.
- [2] Agnes Nagy, Hector Trujillo, "3D magnetic-field sensor using only a pair of terminals," *Sensors and Actuators A58.*, 137-140, 1997.
- [3] R.S. Popovic, "The Vertical Hall-Effect Device," *IEEE Electron Devices Lett.*, vol. EDL-5, pp.357-358, 1984.
- [4] Lj. Ristic, T. Smy, H.P. Baltes, "A lateral magnetotransistor structure with linear response to the magnetic field," *IEEE Trans. Electron. Dev.*, ED-36, 1076-1089, 1989.
- [5] Henry P. Baltes, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor," *IEEE Trans. Electron Device.*, vol. 74, pp. 315-317, no. 8, 1986.
- [6] H. Trujillo, A. Nagy and J.C. Cruz, "Influence of topology on the response of lateral magnetotransistor," *Sensors and Actuators A45.*, pp. 179-182, 1994.
- [7] T. Smy and Lj. Ristic, "Optimization of Magnetotransistor Structure in CMOS Technology," *IEEE Trans. Magnetic. Dev.*, vol 28, no. 5, 2024-2030, 1992.
- [8] T. Nakamura and K. Maenaka, "Integrated Magnetic Sensor," *Sensors and Actuators A.*, vol 35, pp.21-23, 1990.
- [9] Agnes Nagy and Hector Trujillo, "Highly sensitive magnetotransistor with new topology," *Sensors and Actuators A65.*, pp. 97-100, 1998.
- [10] Radivoje S. Popovic and Rolf Widmer, "Magnetotransistor in CMOS Technology," *IEEE Trans. Electron. Dev.*, ED-33, no. 9, pp. 1334-1340, 1986.
- [11] Lj. Ristic, H.P. Baltes, T. Smy and I. Filanovsky, "Suppressed Sidewall Injection Magnetotransistor with focus Emitter Injection and Carrier Double Deflection," *IEEE Electron Devices Lett.*, EDL-8, no. 9, pp.395-397, 1987.
- [12] S. Kordic, "Integrated 3-D Magnetic Sensor Based on an n-p-n Transistor," *IEEE Electron Devices Lett.*, EDL-7, no. 3, pp. 196-198, 1986.
- [13] R.D. Tikhonov, "Sensor on Bipolar Magnetotransistor with the Base in the well," *Solid-State Electronic.*, vol 49, pp. 1302-1308, 2005.
- [14] C.S. Roumenin, "Solid State Magnetic Sensors," *Elsevier.*, 1994.
- [15] C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpoopee, P. Pengpad, E. Chaowicharat, C. Hiruanun and A. Poyai, "Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination - Deflection Effect," *IEEE Sensor - Journal*, Vol 10, no.2, pp. 294-299, 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายชนะ สัททพงษ์พันธ์
วัน เดือน ปีเกิด	18 พฤศจิกายน 2523
ที่อยู่	17/37 หมู่บ้าน บ้านปริญ ถ.รามอินทรา-วัชรพล แขวงท่าแร้ง เขตบางเขน กรุงเทพฯ 10230 โทร.0-2347-0543
ประวัติการศึกษา	2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2549 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การออกแบบสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ 2.) การออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3.) กระบวนการผลิตวงจรรวมด้วยเทคโนโลยีซีมอส
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2546-2550	ตำแหน่งวิศวกรระดับ 4 กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
พ.ศ.2550-ปัจจุบัน	ตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้