แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

3-AXIS MAGNETIC FIELD MAGNETOTRANSISTOR

สมุจเฉท ม่วงทอง

SAMUDCHAD MUANGTHONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-043-086

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

3-AXIS MAGNETIC FIELD MAGNETOTRANSISTOR

สมุจเฉท ม่วงทอง

SAMUDCHAD MUANGTHONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-043-086

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3-AXIS MAGNETIC FIELD MAGNETOTRANSISTOR

SAMUDCHAD MUANGTHONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONIC ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2016-EN-M-043-086

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 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน
Thesis Title 3-Axis Magnetic Field Magnetotransistor
นักศึกษา นายสมุจเฉท ม่วงทอง
รหัสประจำตัว 54612414
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรกูล
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-043-086

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
ดร.รังสรรค์	เมืองเหลือ	
ดร.อัมพร	โพธิ์ใย	
ดร.วีระ	เพ็งจันทร์	
รศ.ดร.เติมพงษ์	เพ็ชรกูล	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันพุธที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 11.30-13.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน
นักศึกษา	นายสมุจเฉท ม่วงทอง
รหัสประจำตัว	54612414
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรกูล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนซึ่งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ เนื่องมาจากผลของการรวมตัวใหม่และผลของการเบี่ยงเบนของพาหะ เป็นโครงสร้างที่พัฒนาขึ้นมาจากโครงสร้างเดิมที่สามารถวัดสนามแม่เหล็กได้เพียง 1 หรือ 2 ทิศทางเท่านั้น โครงสร้างมีลักษณะคล้ายแมกนีโตทรานซิสเตอร์ 4 ตัวต่อรวมกันโดยมีขั้วอิมิตเตอร์ต่อร่วมกัน แต่ขั้วเบสและขั้วคอลเลคเตอร์แยกจากกัน ดังนั้นโครงสร้างจะประกอบไปด้วยอิมิตเตอร์ 1 ขั้วคอลเลคเตอร์ 4 ขั้วและเบส 4 ขั้ว ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาแมกนีโตทรานซิสเตอร์จากการจำลองแบบโครงสร้างเพื่อศึกษากลไกการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากสนามแม่เหล็กทิศทางต่างๆ(X,Y และ Z) จากนั้นพัฒนาแมกนีโตทรานซิสเตอร์โครงสร้างใหม่ที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_X, B_Y และ B_Z ได้ ด้วยโปรแกรมจำลองแบบ TCAD Sentaurus และได้มีการนำเสนอผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนที่สร้างขึ้นจริงเพื่อพิสูจน์ว่าโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_X, B_Y และ B_Z ได้ โดยที่กระแสไบอัสอิมิตเตอร์ 1 mA ค่าความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_X, B_Y และ B_Z จากอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริงอยู่ในช่วง 10.24 – 26.22 mV/T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	3-Axis Magnetic field Magnetotransistor
Student	Mr.Samudchad Muangthong
Student ID.	54612414
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronic Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Toempong Phetchakul

ABSTRACT

This thesis presents a 3-axis magnetic field magnetotransistor, which can detect the magnetic field in 3 directions. The operating principle of the device is based on the carrier recombination – deflection due to Lorentz force while magnetic field passing through the device that causes the difference between base and collector currents ($\Delta I_{CB} \neq 0$). The structure is developed from the original structure that can detect the magnetic field has only one or two directions. The structure is developed from integration of four magnetotransistors that use a common emitter but bases and collectors are separated independently. The device consists one emitter, four collectors and four bases. In this research, mechanism of carrier deflection while magnetic field (B_X, B_Y and B_Z) passing through the device (magnetotransistor) that are studied by TCAD Sentaurus program. Finally, present a response to the magnetic field of 3-axis magnetic field magnetotransistor that fabricated in order to prove that the structure of 3-axis magnetic field magnetotransistor can detect magnetic fields B_X, B_Y and B_Z. At emitter bias 1 mA, the sensitivity of device in magnetic fields B_X, B_Y and B_Z is in range 10.24 – 26.22 mV/T.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดีด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรกูล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ที่ให้คำแนะนำช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้แก่ข้าพระเจ้าและขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronics Center:TMEC) ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่ การใช้เครื่องมือวัดต่างๆ และพี่ๆ ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและคอยชี้แนะแนวทางต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์ และคุณวิทวัส แย้มวงษ์ ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการออกแบบการเขียนบทความ และการทำการทดลอง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่คอยให้คำแนะนำต่างๆ และเป็นกำลังใจให้เสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้องของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สมุจเฉท ม่วงทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญตาราง IX
สารบัญรูป X
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา 3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่เกี่ยวข้อง 3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย 3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา 4

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 6
2.1 อุปกรณ์ฮอลล์ 7
2.1.1 หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์ 7
2.1.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ 12
2.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ 15
2.2.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง 15
2.2.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน 17
2.2.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา 19
2.3 คุณสมบัติทั่วไปของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ 20
2.3.1 ย่านวัด 21
2.3.2 ความผิดพลาด 21
2.3.3 ความแม่นยำและความเที่ยงตรง 21
2.3.4 ความไว 21
2.3.5 ความเป็นเชิงเส้น 21
2.3.6 ความมีเสถียรภาพ 22
2.3.7 ฮีสเตอร์รีซิส 22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3.8 การแยกชัด 23

2.3.9 ออฟเซต 23

2.3.10 ความเร็วในการตอบสนอง 23

บทที่ 3 โปรแกรม Sentaurus TCAD และการจำลองแบบ 24

3.1 บทนำ TCAD 24

3.1.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง 24

3.1.2 การจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ 25

3.2 โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD 26

3.2.1 Sentaurus Workbench 27

3.2.2 Sentaurus Process 28

3.2.3 Sentaurus Structure Editor 28

3.2.3.1 Ligament 29

3.2.4 Sentaurus Device 31

3.2.4.1 File 32

3.2.4.2 Electrode 33

3.2.4.3 Physics 33

3.2.4.4 Plot 33

3.2.4.5 Solve 34

3.2.5 Sentaurus Visual 35

3.3 การจำลองแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาโดย TCAD 36

3.3.1 การออกแบบ layout ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา 36

3.3.2 การกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา .. 38

3.3.3 การสร้าง mesh และกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา 39

3.3.4 โครงสร้างในการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา 40

3.4 การจำลองแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนโดย TCAD 41

3.4.1 การออกแบบ layout ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน 41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.4.2 การกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน ... 43
3.4.3 การสร้าง mesh และกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน ... 43
3.4.4 โครงสร้างในการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน ... 44
3.5 การกำหนดแบบจำลองปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง ... 45

บทที่ 4 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนและเทคโนโลยีการผลิตที่เกี่ยวข้อง ... 48
4.1 กระบวนการออกซิเดชัน ... 48
4.1.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง ... 49
4.1.2 การออกซิเดชันแบบเปียก ... 49
4.1.3 การสร้างชั้นออกไซด์หนา ... 50
4.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี ... 51
4.2.1 การทำความสะอาดผิวหน้า ... 52
4.2.2 การเตรียมผิวหน้า ... 53
4.2.3 การเคลือบน้ำยาไวแสง ... 54
4.2.3.1 น้ำยาไวแสง ... 54
4.2.3.2 วิธีการเคลือบ ... 55
4.2.4 การอบ ... 56
4.2.5 การปรับมาร์คและการฉายแสง ... 57
4.2.5.1 การปรับมาร์ค ... 57
4.2.5.2 การฉายแสง ... 59
4.2.6 การล้างน้ำยาไวแสง ... 60
4.3 การกัด ... 60
4.3.1 การกัดแบบเปียก ... 60
4.3.2 การกัดแบบแห้ง ... 61
4.4 การแพร่สารเจือ ... 61
4.6.1 การแพร่สารเจือชนิดพี ... 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.6.2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น 63
4.5 การยิงฝังประจุ 63
4.5.1 การยิงฝังประจุสารเจือชนิดพี 63
4.5.2 การยิงฝังประจุสารเจือชนิดเอ็น 63
4.6 การสร้างชั้นโลหะ 65
4.7 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน 67
4.7.1 การออกแบบกระจกต้นแบบ 67
4.7.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน 70

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง 78
5.1 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา 78
5.1.1 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Z ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา 79
5.1.2 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Y ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา 81
5.1.3 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_X ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา 82
5.2 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน 83
5.2.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ 83
5.2.2 ขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก 84
5.2.3 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Z ที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกันของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน 86
5.2.4 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Z จากการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน 88
5.2.5 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Y ที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกันของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน 89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.2.6 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Y จากการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน 92

5.2.7 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_X ที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกันของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน 93

5.2.8 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X จากการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน 96

5.3 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริง 97

5.3.1 วงจรวัดผลการทดลอง 97

5.3.2 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Z ของอุปกรณ์ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA 99

5.3.3 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Z 100

5.3.4 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Y ของอุปกรณ์ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA 100

5.3.5 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Y 101

5.3.6 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_X ของอุปกรณ์ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA 101

5.3.7 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X 102

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง 104

เอกสารอ้างอิง 106

ภาคผนวก 108

ภาคผนวก (ก) คุณสมบัติทั่วไปของซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์ 109

ภาคผนวก (ข) โปรแกรมจำลองแบบ Sentaurus TCAD 111

ภาคผนวก (ค) ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ 122

ประวัติผู้เขียน 133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 พารามิเตอร์ในโมเดลที่เกี่ยวข้องกับสภาพคล่องพาหะ 45

4.1 กระบวนการออกซิเดชันที่แตกต่างกัน 50

4.2 ขนาดสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง (Exposure Light Source) ชนิดต่างๆ 59

4.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติในด้านต่างๆ ระหว่างกระบวนการแพร่สารเจือกับการยิงฝังประจุ.......... 65

5.1 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Z จากการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน 89

5.2 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Y จากการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน 93

5.3 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X จากการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน 96

5.4 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Z ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA 100

5.5 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Y ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA...................... 101

5.6 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA 102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 การแบ่งประเภทของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก....6

2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี....7

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิค....9

2.4 ด้านตัดขวางโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์....13

2.5 โครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวดิ่ง (ก) มุมมองด้านบนและ (ข) ภาคตัดขวาง....14

2.6 โครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวนอน (ก) มุมมองด้านบนและ (ข) ภาคตัดขวาง....15

2.7 ด้านตัดขวางโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวดิ่ง....16

2.8 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน....17

2.9 หลักการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน (ก) เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กและ (ข) เมื่อมีสนามแม่เหล็กที่ไม่เป็นศูนย์ตัดผ่าน....18

2.10 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา....19

2.11 พื้นที่การเบี่ยงเบนของพาหะ (โฮล) ทำมุมเบี่ยงเบน θ_H....19

2.12 ความไม่เป็นเชิงเส้นของกราฟ....22

2.13 ฮีสเตอร์รีซิสสัญญาณเอาท์พุทที่แตกต่างไปจากค่าเดิม....22

3.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง....25

3.2 การจำลองแบบตัวอุปกรณ์โดยการจำลองการทำงานด้วย TCAD....25

3.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของการจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ....26

3.4 ภาพรวมของการจำลองโดย TCAD....26

3.5 หน้าต่างการทำงานของ Sentaurus Workbench....27

3.6 การยิงฝังประจุใน Sentaurus Process....28

3.7 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Flow Editor....29

3.8 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Layout Editor....30

3.9 หน้าสัมผัสไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ในการจำลองการทำงาน....30

3.10 การจำลองตัวอุปกรณ์หลังจากการสร้างเมส....31

3.11 แผนผังไฟล์อินพุทและเอาท์พุทใน Sentaurus Device....32

3.12 หน้าต่างของ Sentaurus visual....35

3.13 layer ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา (ก) layer ที่ 1 อิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ (ข) layer ที่ 2 เบส (ค) layer ที่ 3 ชั้นโลหะ....37

3.14 เส้นพารามิเตอร์ของอุปกรณ์และเส้นขอบเขตการจำลองแบบ 3 มิติ....38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.15 การกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ใน Ligament Flow 39

3.16 การสร้าง mesh และการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา...... 40

3.17 โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาที่ใช้ในการจำลองแบบ
การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก 40

3.18 layer ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน (ก) layer ที่ 1อิมิตเตอร์
และคอลเลคเตอร์ (ข) layer ที่ 2 เบส (ค) layer ที่ 3 ชั้นโลหะ 42

3.19 เส้นพารามิเตอร์ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนและเส้นขอบเขต
การจำลองแบบ 3 มิติ 43

3.20 การสร้าง mesh และการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับ
สนามแม่เหล็ก 3 แกน 44

3.21 โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์
ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน 44

4.1 กระบวนการเกิดชั้นออกไซด์บนผิวของแผ่นซิลิคอน 49

4.2 การสร้างชั้นออกไซด์เฉพาะที่จากกระบวนการออกซิเดชัน 50

4.3 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการโฟโตลิโตกราฟฟี 52

4.4 ขั้นตอนกระบวนการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์ 53

4.5 กระบวนการเตรียมผิวหน้าก่อนเคลือบน้ำยาไวแสง 53

4.6 คุณสมบัติทางแสงที่แตกต่างกันของน้ำยาไวแสงสองชนิด 54

4.7 การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีการสปินเนอร์ 55

4.8 การลอกฟิล์มที่ขอบของแผ่นผลึกหลังจากการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยการสปินเนอร์ 56

4.9 กระบวนการถ่ายแบบจากมาส์คไปยังผิวของแผ่นเวเฟอร์.. 57

4.10 กระบวนการปรับมาส์คและการฉายแสงด้วยระบบสเต็ปเปอร์ (Stepper)............................ 58

4.11 เปรียบเทียบผลจากการกัดด้วยกระบวนการสองแบบ (ก) การแบบเปียก (Wet etch)
และ (ข) การกัดแบบแห้ง (Dry etch).. 61

4.12 ลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการแพร่สารเจือ 62

4.13 ลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการยิงฝังประจุ 64

4.14 การต่อชั้นโลหะสำหรับเชื่อมตัวขาอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก 65

4.15 กระบวนการระเหยในสุญญากาศ (Evaporation).. 66

4.16 การออกแบบอุปกรณ์ด้วยโปรแกรม L-edit... 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.17 (ก) - (ฉ) ชั้นทั้งหมดสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน 69

4.18 โครงสร้างของอุปกรณ์ 69

4.19 กระจกต้นแบบ 70

4.20 แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น 70

4.21 การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 70

4.22 การสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ 70

4.23 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีชั้นที่ 1 (ก) การเคลือบน้ำยาไวแสงและ (ข) การ develop 71

4.24 (ก) การกัดไนไตรด์และ (ข) ล้างน้ำยาไวแสง 71

4.25 (ก) การสร้างชั้น LOCOS oxide และ (ข) การกัดชั้นไนไตรด์ 72

4.26 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีชั้นที่ 2 หลังจากผ่านการ develop 72

4.27 (ก) การยิงฝังประจุฟอสฟอรัสและ (ข) การล้างน้ำยาไวแสง 72

4.28 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีชั้นที่ 3 หลังจากผ่านการ develop 73

4.29 (ก) การยิงฝังประจุโบรอนและ (ข) การล้างน้ำยาไวแสง 73

4.30 การสร้างชั้น TEOS 73

4.31 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีชั้นที่ 4 หลังจากผ่านการ develop 74

4.32 (ก) การกัดชั้นออกไซด์และ (ข) ล้างน้ำยาไวแสงจากนั้น (ค) สร้างชั้นโลหะ 74

4.33 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีชั้นที่ 5 หลังจากผ่านการ develop 75

4.34 (ก) การกัดชั้นโลหะส่วนที่ไม่ต้องการและ (ข) การสร้างชั้นไนไตรด์ 75

4.35 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีชั้นที่ 6 หลังจากผ่านการ develop 76

4.36 (ก) การกัดชั้นไนไตรด์จากนั้น (ข) ล้างชั้นน้ำยาไวแสงและ (ค) อุปกรณ์ที่เสร็จสมบูรณ์ 76

4.37 (ก) แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนในแผ่นซิลิคอนที่สร้างเสร็จเรียบร้อยและ (ข) อุปกรณ์หลังจากผ่านการบรรจุภัณฑ์ 77

5.1 วงจรวัดผลการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา 78

5.2 ความหนาแน่นกระแสโดยการจำลองแบบ 3 มิติขณะไม่มีสนามแม่เหล็กในกรณี (ก) ไม่ได้ปรับค่าออฟเซต (ข) เมื่อปรับค่าออฟเซต 79

5.3 การเบี่ยงเบนพาหะของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ขณะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Z 80

5.4 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง Z ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา 80

5.5 ทิศทางของพาหะขณะมีสนามแม่เหล็กแนวนอน B_Y 81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.6 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง Y ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา 82

5.7 ผลการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา (ก) ไม่มีสนามแม่เหล็กและ (ข) เมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_X 83

5.8 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน 84

5.9 วงจรวัดผลการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน 84

5.10 การเคลื่อนที่ของพาหะขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน (B=0) (ก) E-B1-C1 (ข) E-B2-C2 (ค) E-B3-C3 (ง) E-B4-C4 85

5.11 ผลการจำลองแบบการตอบสนองสนามแม่เหล็ก B_Z ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนที่กระแสอิมิตเตอร์ (ก)1, (ข)3 และ (ค)5mA 87

5.12 ทิศทางการเบี่ยงเบนของพาหะขณะตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_Z (ก) E-B1-C1 (ข) E-B2-C2 (ค) E-B3-C3 (ง) E-B4-C4 88

5.13 ผลการจำลองแบบการตอบสนองสนามแม่เหล็ก B_Y ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนที่กระแสอิมิตเตอร์ (ก)1, (ข)3 และ (ค)5mA 90

5.14 ทิศทางการเบี่ยงเบนของพาหะโฮลขณะมีสนามแม่เหล็ก B_Y ตัดผ่าน (ก) E-B1-C1 (ข) E-B2-C2 (ค) E-B3-C3 (ง) E-B4-C4 (จ) E-B4-C2 92

5.15 ผลการจำลองแบบการตอบสนองสนามแม่เหล็ก B_X ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนที่กระแสอิมิตเตอร์ (ก)1, (ข)3 และ (ค)5mA 94

5.16 ทิศทางการเบี่ยงเบนของพาหะโฮลขณะมีสนามแม่เหล็ก B_X ตัดผ่าน (ก) E-B1-C1 (ข) E-B2-C2 (ค) E-B3-C3 (ง) E-B4-C4 (จ) E-B3-C1 95

5.17 การวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน (ก) วงจรวัดผล (ข) ระบบการวัดสนามแม่เหล็ก 98

5.18 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Z ของอุปกรณ์ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA 99

5.19 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Y ของอุปกรณ์ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA 101

5.20 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_X ของอุปกรณ์ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA 102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำได้มีการวิจัยพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ อย่างหลากหลาย เช่น อุปกรณ์ตรวจจับแรงดัน อุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิ, อุปกรณ์ตรวจจับแสง หรืออุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ฯลฯ การพัฒนาโครงสร้างและการทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้ได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพมากที่สุด สำหรับสิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับการพัฒนามาโดยตลอดคือ อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กหรือเซ็นเซอร์แม่เหล็ก ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำมาพัฒนาโครงสร้างและประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก เช่น ไดโอด, ทรานซิสเตอร์, มอสเฟส เป็นต้น สำหรับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ถือเป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่มีบทบาทและถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีโครงสร้างขนาดเล็ก, สัญญาณรบกวนที่เอาท์พุทมีค่าต่ำ, สามารถใช้งานกับวงจรรวมได้และสามารถประยุกต์ใช้งานต่างๆได้หลากหลาย

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor) เป็นเซ็นเซอร์แม่เหล็กชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างคล้ายกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์(Bipolar Transistor) คือประกอบด้วย อิมิตเตอร์(E), เบส(B) และคอลเลคเตอร์(C) ซึ่งอาศัยหลักการทำงานจากปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยทั่วไปแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทด้วยกันคือ 1.แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะไหลในแนวดิ่ง (Vertical Magnetotransistor) ใช้สำหรับวัดสนามแม่เหล็กในทิศทางขนานกับผิวอุปกรณ์ และ 2. แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะไหลในแนวนอน (Lateral Magnetotransistor) ใช้สำหรับวัดสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก โดยทั่วไปนั้นโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ประกอบไปด้วยอิมิตเตอร์หนึ่งขา, คอลเลคเตอร์สองขาและเบสอีกสองขา ซึ่งเรียกว่า “แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิด 5 ขา” ทำงานโดยอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนพาหะ(carrier deflection) และกลไกการมอดูเลท (modulation) ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะที่ฉีดจากอิมิตเตอร์ไปยังคอลเลคเตอร์ทั้งสองขา ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_C) โดยกลไกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความสัมพันธ์กับขนาดของสนามแม่เหล็กและอัตราการฉีดพาหะจากอิมิตเตอร์ ดังนั้นจากหลักการที่กล่าวมานี้ทำให้สามารถนำอุปกรณ์ไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กได้

1.1 ความเป็นมาและที่มาของงานวิจัย

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะไหลในแนวนอนในยุคเริ่มแรก เป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดห้าขา โดยโครงสร้างประกอบขึ้นด้วย อิมิตเตอร์ (p+) 1 ขา, เบส (n+) 2 ขา และคอลเลคเตอร์ (p+) 2 ขา บนฐานรองชนิดเอ็น (n-Substrate) ซึ่งทำงานโดยอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนพาหะและการมอดูเลท แต่การที่อุปกรณ์มีโครงสร้างเป็นแบบห้าขาซึ่งมีความยุ่งยากซับซ้อน ดังนั้นการนำไปใช้งานจำเป็นต้องให้ไบอัสทั้งจากอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์และระหว่างเบสกับเบสทั้งสอง เพื่อให้สามารถใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานอุปกรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งพบว่ามีความยุ่งยากของการนำอุปกรณ์ไปใช้งาน ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาและปรับปรุงแมกนีโตทรานซิสเตอร์ขึ้นมาใหม่ให้มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและสะดวกต่อการนำไปใช้งาน โดยการลดจำนวนขาของอุปกรณ์ลงให้เลือกเพียงสามขาคือ อิมิตเตอร์ (p+), เบส (n+) และคอลเลคเตอร์ (p+) บนฐานรองชนิดเอ็น (n-Substrate) ซึ่งเรียกว่า “แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดสามขา” ทำงานโดยอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนพาหะ(โฮล) และกลไกการรวมตัวใหม่ (recombination) ของพาหะที่ฉีดจากอิมิตเตอร์ไปยังคอลเลคเตอร์กับเบสเพียงอย่างเดียว ซึ่งการใช้งานจะเหมือนกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ทำงานในโหมดแอคทีฟ ทำให้มีความสะดวกในการนำไปใช้งานมากยิ่งขึ้น แต่พบว่าอุปกรณ์สามารถวัดสนามแม่เหล็กได้เพียง 2 ทิศทางเท่านั้น คือสนามแม่เหล็กทิศทางแนวดิ่งและสนามแม่เหล็กทิศทางแนวนอนโดยที่สนามแม่เหล็กทิศทางแนวนอนนั้นต้องไม่ขนานกับกระแสไฟฟ้า

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการนำเสนอแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบใหม่ที่พัฒนาและปรับปรุงมาจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดสามขา โดยโครงสร้างแบบใหม่นี้ให้ชื่อว่า “แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน (3-Axis Magnetic field Magnetotransistor)” เป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีความสามารถในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_X, B_Y และ B_Z ได้ โดยโครงสร้างของอุปกรณ์ประกอบด้วย อิมิตเตอร์(p+) 1 ขั้ว, เบส(n+) และคอลเลคเตอร์(p+) อย่างละ 4 ขั้วสร้างบนฐานรองจากซิลิคอนชนิดเอ็น (n-Substrate) ซึ่งอุปกรณ์ทำงานโดยอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และกลไกการรวมตัวใหม่ (recombination) ในเบส โดยขั้วเบสและขั้วคอลเลคเตอร์ที่เพิ่มขึ้นมานั้นมีส่วนช่วยให้อุปกรณ์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางขนานกับกระแสได้ ทำให้อุปกรณ์สามารถวัดสนามแม่เหล็กจากทิศทาง X, Y และ Z ได้โดยที่ไม่ต้องขยับหรือเคลื่อนที่อุปกรณ์

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1. ศึกษาหลักการทำงานและทำความเข้าใจขั้นตอนกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์
2. ศึกษาการจำลองโครงสร้างและกลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X, B_Y และ B_Z
3. ศึกษาการจำลองโครงสร้างและการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X, B_Y และ B_Z
4. ศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์, ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและความแตกต่างของกระแสไฟฟ้า
5. ศึกษาค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวดิ่งและแนวนอนได้โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบส (ΔI_{CB}) กลไกในการเกิดความแตกต่างขึ้นอยู่กับการเบี่ยงเบนพาหะ (carrier deflection) และกระแสเนื่องมาจากการวมตัวใหม่ของพาหะ (recombination)

2. การตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาไม่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางขนานกับกระแสไฟฟ้า

3. การตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_X, B_Y และ B_Z ได้

4. แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน ที่สร้างขึ้นจริงสามารถตรวจจับ B_X, B_Y และ B_Z ได้ เหมือนกับผลจากการจำลองแบบ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

แมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวดิ่งและแนวนอนได้โดยอาศัยทฤษฎีปรากฏการณ์ฮอลล์ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB}) ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ทำศึกษาและปรับปรุงแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาให้สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_X, B_Y และ B_Z ได้โดยการพัฒนาโครงสร้างขึ้นมาใหม่ซึ่งมีชื่อว่า “แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน” ซึ่งพัฒนาโครงสร้างมาจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา โดยโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนประกอบด้วย อิมิตเตอร์ 1 ขั้ว เบส 4 ขั้วและคอลเลคเตอร์ 4 ขั้วโดยสร้างบนฐานรองชนิดเอ็น (n-substrate) ขั้วที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุปกรณ์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X, B_Y และ B_Z ได้ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนอาศัยหลักการตรวจจับสนามแม่เหล็กเหมือนกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ศึกษาการจำลองแบบเพื่อพัฒนาโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาให้สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_X, B_Y และ B_Z ได้ โดยการเพิ่มขั้วการใช้งานการตรวจจับสนามแม่เหล็กในกรณีที่สนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับกระแสไฟฟ้าจะยังคงมีขั้วของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ เช่น สนามแม่เหล็กมีทิศทาง X ขั้ว E-B2-C2 และ E-B4-C4 จะไม่เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับกระแสไฟฟ้าแต่ขั้ว E-B1-C1 และ E-B3-C3 จะเกิดการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากสนามแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าทำให้อุปกรณ์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง X ได้ เป็นต้น รวมถึงแสดงผลการตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริงอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่มีโครงสร้างแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์
2. ศึกษาการออกแบบและกระบวนการสร้างด้วยโปรแกรม TCAD
3. ศึกษาการออกแบบและกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน
4. ศึกษาผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_X, B_Y และ B_Z ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาด้วยโปรแกรม TCAD
5. ศึกษาผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_X, B_Y และ B_Z ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนด้วยโปรแกรม TCAD
6. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนกระแสไบอัสต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก
7. เปรียบเทียบความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_X, B_Y และ B_Z ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนในแต่ละขั้วที่ใช้งาน

โดยเนื้อหาในวิทยานิพนธ์จะแบ่งเป็นบทต่างๆตามรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ

เป็นบทนำ ซึ่งกล่าวถึงวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีหรือแนวคิดของงานวิจัย ขอบเขตของงานจิวัยและขั้นตอนของการศึกษา สำหรับงานวิจัยนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เป็นทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ เช่น หลักการปรากฏการณ์ของฮอลล์และหลักการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก รวมทั้งหลักการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์และคุณสมบัติทั่วไปของอุปกรณ์เซ็นเซอร์

บทที่ 3 โปรแกรม TCAD Sentaurus และการจำลองแบบ

เป็นทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการจำลองแบบการสร้างตัวอุปกรณ์ เช่น กระบวนการออกซิเดชั่น, กระบวนการยิงฝังประจุ, กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี ฯลฯ และกล่าวถึงการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

บทที่ 4 กระบวนการสร้างและเทคโนโลยีการผลิตที่เกี่ยวข้อง

กล่าวถึงเทคโนโลยีพื้นฐานการผลิตอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor device) และกระบวนการผลิตแบบต่างๆ รวมถึงแสดงการออกแบบและขั้นตอนกระบวนการสร้างอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง

กล่าวถึง ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X, B_Y และ B_Z ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา เพื่อแสดงถึงข้อจำกัดในการใช้งาน และผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน ที่พัฒนาโครงสร้างขึ้นจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาเพื่อลบข้อจำกัดการวัดสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X, B_Y และ B_Z ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา รวมถึงแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนที่สร้างขึ้นจริงเพื่อแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างดังกล่าวสามารถใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

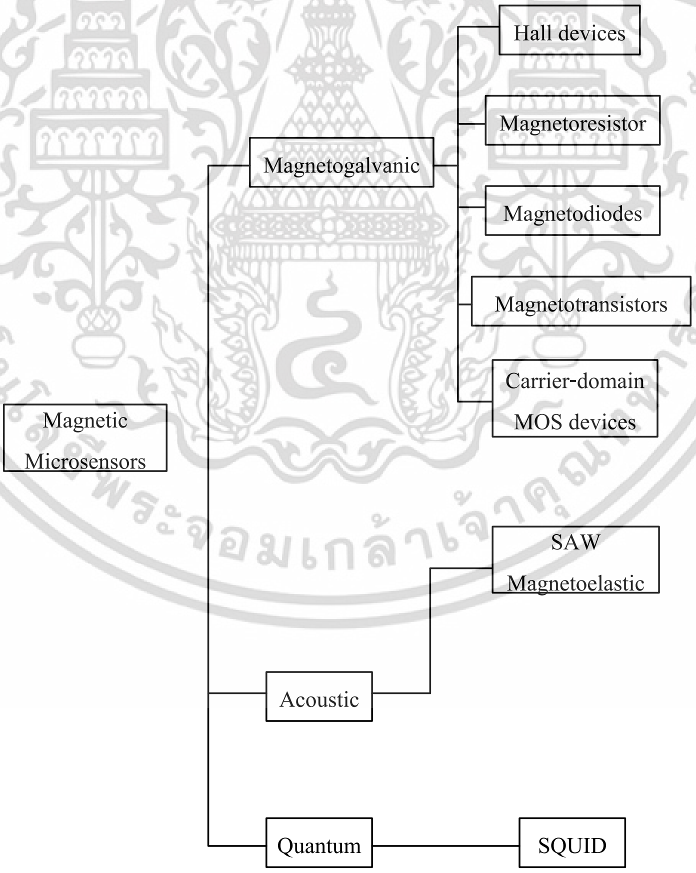
สรุปผลการทดลองทั้งหมดและข้อเสนอแนะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เซ็นเซอร์แม่เหล็ก (Magnetic Sensor) เป็นอุปกรณ์ที่ผลิตขึ้นจากสารกึ่งตัวนำเพื่อใช้ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็ก โดยอาศัยหลักการทำงานจากปรากฏการณ์หลายอย่างด้วยกัน เช่น ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) ,ปรากฏการณ์ความต้านทานแม่เหล็ก (Magnetoresistive Effect) [1] เป็นต้น ซึ่งจากปรากฏการณ์ต่างๆ เหล่านี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กหลายๆชนิดด้วยกัน เช่น ฮอลล์เซ็นเซอร์, แมกนีโตทรานซิสเตอร์, แมกนีโตไดโอด เป็นต้น โดยในปัจจุบันเซ็นเซอร์แม่เหล็กได้มีการพัฒนาให้มีโครงสร้างที่หลากหลายตามวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน

โดยสามารถจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ซึ่งจำแนกตามหลักการทำงานพื้นฐานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแต่ละอุปกรณ์แต่ละชนิดได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Plates)

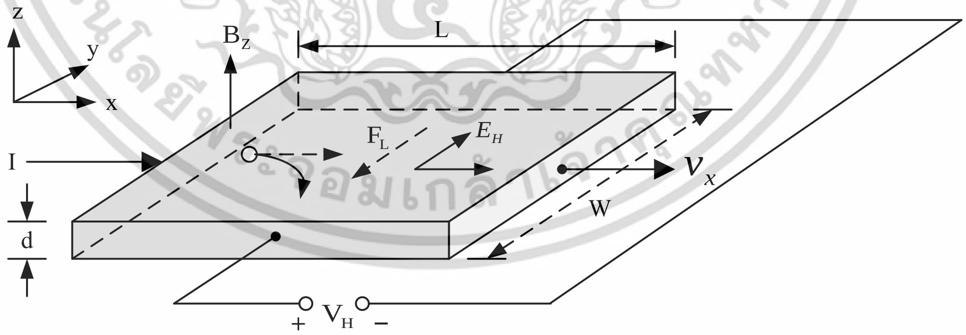
2.1.1 หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์

ใน ค.ศ. 1879 เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) ได้พบว่า เมื่อนำแผ่นตัวนำบางที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก พาหะประจุ (charge carriers) ในตัวนำสามารถเบนไปจากแนวทางเดิมได้ และการเบนนี้มีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในตัวนำบางในทิศตั้งฉากกับทั้งกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก การค้นพบนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์

ในการศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์นั้นสามารถอธิบายได้จากปรากฏการณ์ฮอลล์ การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นการยืนยันแนวคิดที่เป็นไปได้เกี่ยวกับชนิดของพาหะประจุ (charge carrier) ทั้งสองชนิด คือ อิเล็กตรอน และโฮล ที่มีอยู่จริงในสารกึ่งตัวนำ ผลจากการทดลองเรื่องนี้ทำให้สามารถวัด และคำนวณค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำได้ ทั้งยังนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์ อื่นๆ ได้อีกด้วย

พิจารณาแผ่นฮอลล์เพลตดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อนำไปต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟที่มีค่าความต่างศักย์ V โวลท์ ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส (current density) J_X ไหลในทิศ +X และให้สนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น (flux density) B_Z ตัดผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศ +Z

เมื่อโฮล (Hole) คือพาหะส่วนมากและมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นบวก ได้รับอิทธิพลจากสนาม-ไฟฟ้าในทิศทาง +X ส่งผลให้เกิดมีแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วดริฟท์ (drift velocity) v_x ในทิศทาง +X และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_Z ตัดผ่านในทิศตั้งฉากกับกระแส จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อโฮล ดังสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี [10]

$$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B}_Z) \tag{2.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.1 เมื่อ $\vec{F}_L$ คือแรงลอเรนซ์มีขนาดเป็น

$$\left|\vec{F}_L\right| = F_L = q(\vec{v} \times \vec{B}_Z) \tag{2.2}$$

และมีทิศทางของแรงลอเรนซ์อยู่ในแกน –Y ซึ่งจะทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปยังแกน –Y และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ ด้านตรงข้าม (ด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำ) จึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น เนื่องจากโฮลทางด้านหน้ามีจำนวนมากๆ ในขณะที่ด้านหลังมีจำนวนของโฮลน้อยกว่าทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน (E_H) ในทิศ +Y สนามไฟฟ้านี้จะต้านทานการเคลื่อนที่ของโฮลซึ่งถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ในภาวะสมดุล ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ตรงไปในทิศ +Y ได้แสดงว่าแรงลอเรนซ์ (F_L) และแรงจากสนามไฟฟ้าภายใน (eE_H) มีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$eE_H = F_L = e \cdot v_x \cdot B_z \tag{2.3}$$

จากสมการ

$$E_H = v_x \cdot B_z \tag{2.4}$$

และสมการ

$$J_x = p \cdot e \cdot v_x \quad \text{หรือ} \quad v_x = \frac{J_x}{p \cdot e} \tag{2.5}$$

ดังนั้นแทนค่า v_x ในสมการที่ 2.5 ลงในสมการที่ 2.4 จะได้ค่าสนามไฟฟ้าภายในดังสมการต่อไปนี้

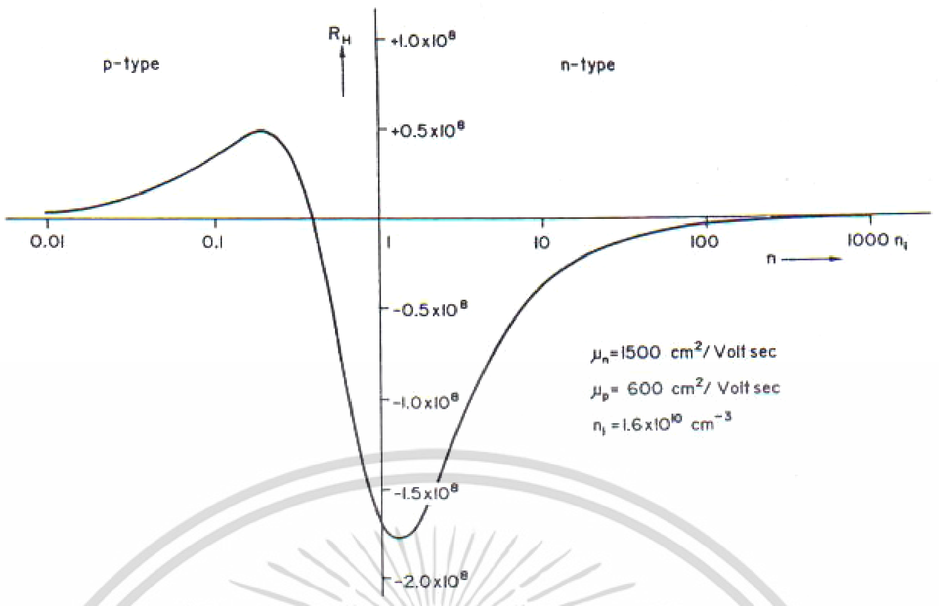
$$E_H = \frac{J_x \cdot B_z}{p \cdot e} \tag{2.6}$$

จากสมการที่ 2.6 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าคงที่ได้ดังนี้

$$\frac{E_H}{J_x \cdot B_z} = \frac{1}{p \cdot e} = R_H \tag{2.7}$$

เมื่อค่า R_H คือค่าสัมประสิทธิ์ของฮอล์ (Hall coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิค

จากรูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดอินทรินซิคซึ่งเปลี่ยนแปลงสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าในการโด๊ปประดับต่ำสามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่มีค่าสูงได้ แต่โดยส่วนมากแล้วจะไม่เลือกใช้ในการโด๊ปประดับต่ำสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์ฮอลล์จะเป็นผลให้แรงดันฮอลล์ที่ได้มีค่าลดลง โดยค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเลือกใช้ได้จากการคำนวณซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำ

จากรูป 2.2 เมื่อทำการวัดแรงดันระหว่างด้านหน้า และด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ W จะได้

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

โดย V_H คือแรงดันฮอลล์ ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ $$R_H = \frac{d \cdot V_H}{I \cdot B_z} = \frac{1}{p \cdot e} \tag{2.9}$$

ดังนั้นจะได้สมการแรงดันฮอลล์ในรูปของกระแสกับสนามแม่เหล็กคือ

$$V_H = \frac{I \cdot B_z}{p \cdot e \cdot d} \tag{2.10}$$

จากสมการที่ 2.9 และ 2.10 สามารถหาสมการความหนาแน่นของโฮลได้ดังนี้

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

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

$$\rho = R\frac{w.d}{l} = \frac{V}{I}.\frac{w.d}{l} \tag{2.12}$$

และจากสมการ $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e.p.\mu_p}$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mu_p = \frac{1}{e.\rho.p} = \frac{1}{\rho} R_H \tag{2.13}$$

จากสมการ (2.11), (2.12) และ (2.13) จะเห็นว่าการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญของแท่งสารกึ่งตัวนำได้ คือความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพคล่องของพาหะได้เป็นอย่างดี

ในทำนองเดียวกัน ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ค่าแรงดันฮอลล์ (V_H) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพีคือ มีค่าเป็นลบ และสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (R_H) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$R_H = -\frac{1}{n \cdot e} \tag{2.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นโดยการวัดแรงดันฮอลล์ ทำให้เราสามารถบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำได้ ว่าเป็นสารชนิดเอ็น หรือชนิดพีได้ ขณะที่ค่าความไวในการตอบสนอง (Sensitivity: S) คือ อัตราส่วนระหว่างแรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแสและสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$S = \frac{V_H}{I.B} = \frac{R_H.G}{d} = \frac{G.r_n}{p.e.d} \tag{2.15}$$

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

$$\tan\theta_H = \frac{E_H}{E_x} \tag{2.16}$$

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

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

หรือ

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

ดังนั้นจะได้

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

หรือ

$$\mu_p = \sigma \cdot R_H \tag{2.17}$$

ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันของพาหะกับแลททิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ถูกต้องนัก ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลททิซ R_{HL} สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{Hl} = \frac{3\pi}{8} R_H = 1.18 R_H \qquad (2.18)$$

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

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mu_{Hl} = \mu_H = 1.18\mu_p \qquad (2.19)$$

เมื่อ μ_H คือ ค่าสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ (Hall mobility)
และ μ_{Hl} คือ ค่าสภาพความคล่องตัวฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับแลททิซ

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

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

และ

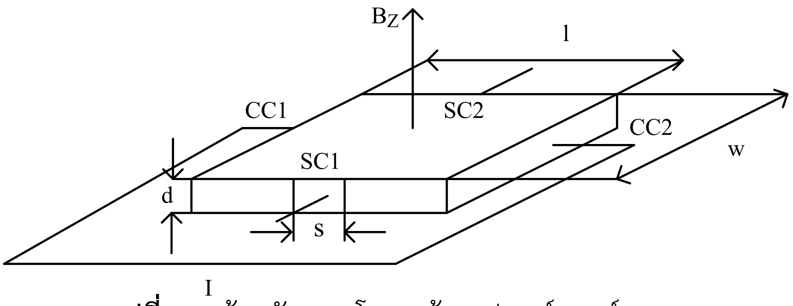
$$\mu_{Hi} = \frac{315\pi}{512}\mu_p = 1.93\mu_p \qquad (2.21)$$

เมื่อ μ_{Hi} คือ ค่าสภาพความคล่องตัวฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ
และ μ_p คือ ค่า Mobility ของโฮล

2.1.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

อุปกรณ์ฮอลล์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยหลักการปรากฏการณ์ของฮอลล์ในการทำงาน โดยลักษณะของอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 โดยจากโครงสร้างแสดงรูปร่างอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีความหนาที่บาง โดยประกอบด้วยขั้วใช้งาน 4 ขั้วคือ CC1, CC2, SC1 และ SC2 เมื่อให้ไบอัสไฟฟ้าระหว่างขา CC1 กับ CC2 จะได้ค่าแรงดันฮอลล์ (V_H) ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขา SC1 กับ SC2 โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ด้านตัดขวางโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ [6]

$$V_H = \frac{R_H \cdot G \cdot I \cdot B_Z}{d} \qquad (2.22)$$

โดยที่ R_H คือสัมประสิทธิ์ฮอลล์, G คือพารามิเตอร์โครงสร้าง, d คือความหนาของอุปกรณ์ฮอลล์, B_z คือความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวดิ่ง

เนื่องจากสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพิจารณาจากพฤติกรรมของพาหะคืออิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งในกรณีอุปกรณ์ฮอลล์ที่อิเล็กตรอนมากกว่าโฮลมากๆ (n>>p) สามารถแสดงสมการแรงดันฮอลล์ได้ดังนี้

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

โดยที่ r_n คือ พารามิเตอร์การกระเจิง (scattering parameter)

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

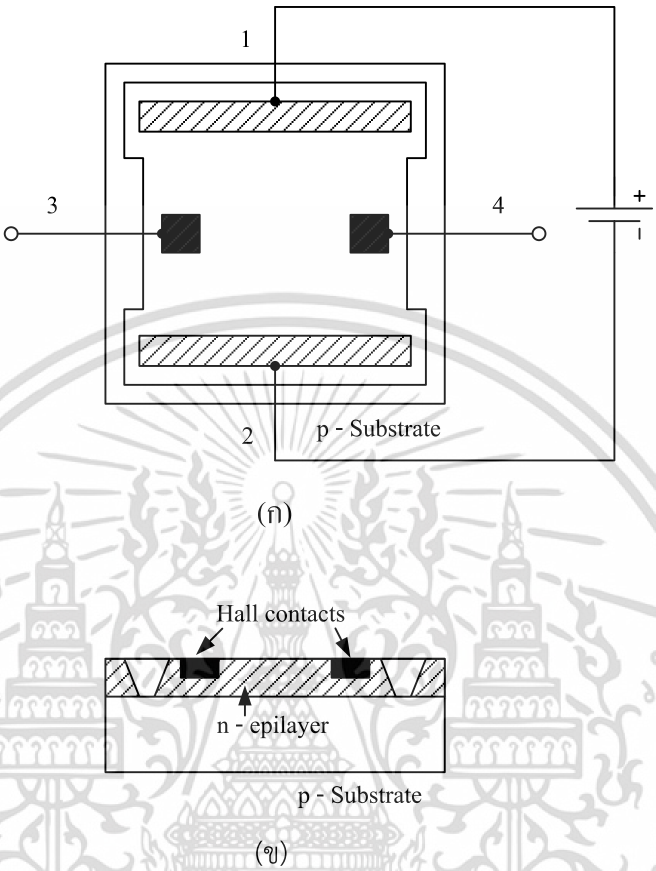
$$G = \left[1 - \exp(-\frac{\pi}{2}.\frac{l}{w}.\frac{\theta_H}{\tan\theta_H})\right].\left[1 - \frac{2}{\pi}.\frac{s}{w}.\frac{\theta_H}{\tan\theta_H}\right] \qquad (2.24)$$

โดยในการออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์จะกำหนดให้ค่า G =1 ซึ่งพารามิเตอร์โครงสร้างจะเท่ากับหนึ่งได้ถ้าออกแบบให้ l/w = 3 และ s/w <1 โดยตำแหน่งของขั้วเซนเซอร์จะออกแบบที่ระยะ 1/2 [6]

ในปัจจุบันอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ อุปกรณ์ฮอลล์แนวดิ่งและแนวนอน [14] ซึ่งแบ่งตามความสามารถในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยรูปที่ 2.5(ก) และ 2.5(ข) แสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมมองด้านบนและด้านภาคตัดขวางของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวดิ่งชนิดเอ็น โดยสร้างบนฐานรองชนิดพีและสร้างด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพล่าร์

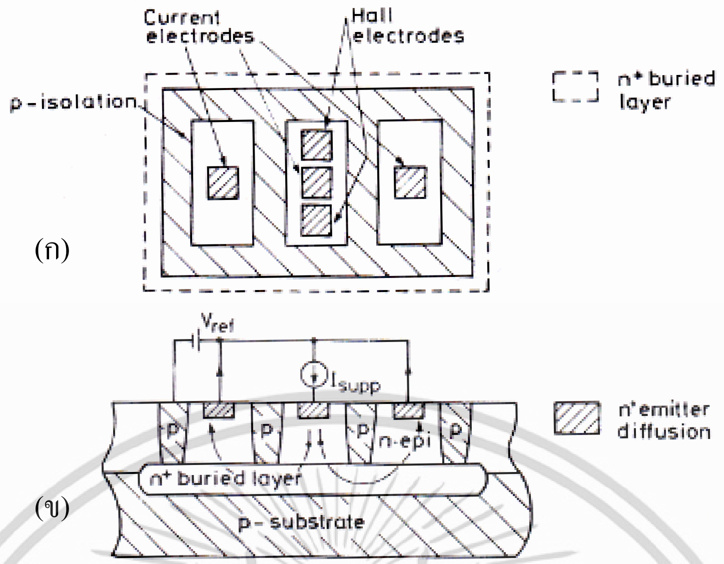


รูปที่ 2.5 โครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวดิ่ง (ก) มุมมองด้านบน และ (ข) ภาคตัดขวาง

กระแสจะไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 และ 2 ขณะที่แรงดันฮอลล์ถูกวัดระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 และ 4 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ $10^{15} – 10^{18}$ cm^{-3} และมีความหนาชั้นอิพิทาเชี่ยลระหว่าง 5 – 10 µm โดยที่ออกแบบมิติของเพลทประมาณ 200 × 200 µm สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชั้นอิพิสามารถลดลงได้โดยใช้วิธีการยิงฝังประจุ (Ion implantation) ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้ขนาดของแผ่นอุปกรณ์ฮอลล์มีความสม่ำเสมอได้

อุปกรณ์ฮอลล์ที่ใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวดิ่งแต่สามารถประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอนได้โดยเรียกว่าอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน โดยแสดงดังรูปที่ 2.6(ก) และ 2.6 (ข) โดยที่โครงสร้างนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นพื้นฐานที่จะสร้างเข็มทิศแม่เหล็ก โดยพื้นที่ของอิเล็กโทรดออกแบบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และพาหะจะมีทิศทางการฉีดในลักษณะแนวดิ่ง เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางขนานกับผิวของอุปกรณ์ [2-5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน (ก) มุมมองด้านบน และ (ข) ภาคตัดขวาง

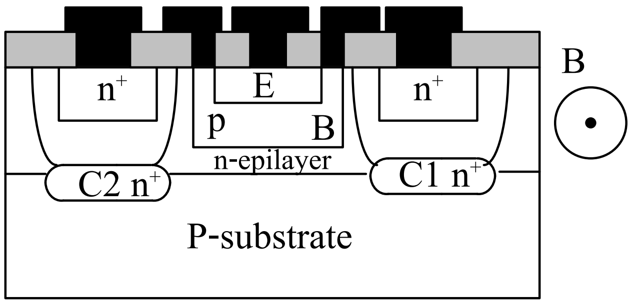
2.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor)

แมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีโครงสร้างแบบไบโพล่าร์ทรานซิสเตอร์ (Bipolar transistor) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง (Vertical magnetotransistor) และ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน (Lateral magnetotransistor) ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ ที่ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะ ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง โดยกลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง (ΔI_C) ขึ้นอยู่กับการเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier deflection) และกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (Modulation current injection) [13-17]

2.2.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง

โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง แสดงดังรูปที่ 2.7 โครงสร้างประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด npn สองตัวต่อกันด้วยอิมิตเตอร์ร่วมและเบสร่วม มีชั้นฝัง (buried layer) อยู่ใต้ส่วนเบส คอลเลคเตอร์ทั้งสองสร้างจากอะตอมสารเจือชนิด n^+ เพื่อไม่ให้ช้อตเซอร์กิตจึงกำหนดให้มีช่องว่างระหว่าง ชั้นฝัง (buried layer) ทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ด้านตัดขวางโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวดิ่ง [6]

พาหะส่วนมากถูกฉีดจากอิมิตเตอร์ผ่านส่วนเบสไปถึงชั้นอิพิของคอลเลคเตอร์ กระแสจะแยกเป็นสองส่วนโดยแต่ละส่วนจะไปถึงชั้นฝัง (buried layer) ทั้งสอง ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากันอยู่ในสภาวะสมดุล $I_{C1} = I_{C2}$ แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสคอลเลคเตอร์ ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะในเบสส่งผลให้กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองไม่สมดุลเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง $\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2}$ ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองสามารถหาได้จากสมการที่ 2.26

$$I_{C0} = I_{C1} + I_{C2} \tag{2.25}$$

เมื่อ I_{C0} คือผลรวมของกระแสคอลเลคเตอร์

$$\Delta I_C = G \cdot \mu_n^* (L/W) \cdot I_{CO} \cdot B \tag{2.26}$$

โดยที่ L คือระยะระหว่างอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์, W คือความกว้างอิมิตเตอร์ และ G คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับโครงสร้างของอุปกรณ์ และ μ_n^* คือค่า mobility โดยสามารถหาค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้จากสมการที่ 2.27

$$S = \left| \frac{\Delta I_C}{I_0 \cdot B} \right| \tag{2.27}$$

แทนสมการที่ 2.26 ลงในสมการที่ 2.27 จะได้

$$S = G \cdot \mu_n^* \cdot \frac{L}{W_E} \tag{2.28}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

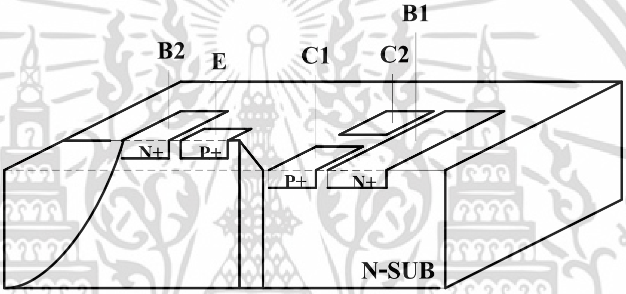
ในสภาวะปกติขณะที่ปราศจากสนามแม่เหล็กตัดผ่าน สามารถหาความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (2.29) และ (2.30)

$$S_A = \left|\partial V_C / \partial B\right|_{B=0} = R_C^{-1}\left|\partial I_C / \partial B\right|_{B=0} \tag{2.29}$$

$$S = V_C^{-1}\left|\partial V_C / \partial B\right|_{B=0} = I_C^{-1}\left|\partial I_C / \partial B\right|_{B=0} \tag{2.30}$$

2.2.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน

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

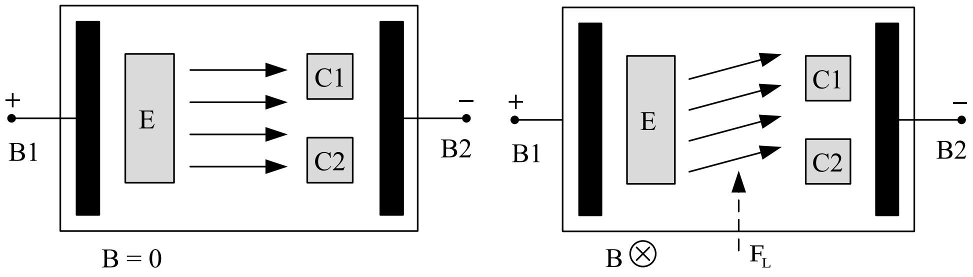


รูปที่ 2.8 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน [14]

โดยการทำงานพาหะจะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปถึงคอลเลคเตอร์ที่แยกกันอยู่สองขาอย่างสมมาตร โดยสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวดิ่งอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง (ΔI_C) กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection)

หลักการทำงานคือ เมื่ออิมิตเตอร์และเบสถูกไบอัสไปข้างหน้าพาหะส่วนมาก (majority carriers) จากอิมิตเตอร์จะถูกฉีดเข้าไปในเบสและข้ามไปยังคอลเลคเตอร์ โดยสนามไฟฟ้าในเบสจะช่วยพาหะเกิดการเคลื่อนที่จากเบสไปยังคอลเลคเตอร์ได้เพิ่มขึ้น ซึ่งในสภาวะปกติที่ปราศจากสนามแม่เหล็ก ($B = 0$) ปริมาณกระแสคอลเคลเตอร์ทั้งสองเท่ากันนั้นคือผลต่างของกระแสคอลเลคเตอร์จะเป็นศูนย์ ($\Delta I_C = 0$) แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ส่งผลให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากทิศทางเดิม ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะสมดุล ผลต่างของกระแสคอลเลคเตอร์ไม่เป็นศูนย์ ($\Delta I_C \neq 0$) จากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดคือนี้ สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 หลักการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน (ก) เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กและ (ข) เมื่อมีสนามแม่เหล็กที่ไม่เป็นศูนย์ตัดผ่าน

ความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ I_{C1} และ I_{C2} สามารถหาได้จากสมการที่ 2.31 เพราะฉะนั้นผลรวมของ I_{C1} และ I_{C2} คือกระแสคอลเลคเตอร์ที่ไหลในภาวะปกตินั่นเอง ดังสมการที่ (2.32) ส่วนสมการที่ (2.33) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ΔI_C กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ซึ่ง ΔI_C แปรผันตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสอิมิตเตอร์ ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบสัมพัทธ์และแบบสมบูรณ์ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.34) และ (2.35) ตามลำดับ

$$\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2} \tag{2.31}$$

$$I_{C0} = I_{C1} + I_{C2} \tag{2.32}$$

$$\Delta I_C = K_g(\mu_p + \mu_n)B_z \cdot I_E \tag{2.33}$$

ซึ่ง μ_p และ μ_n คือค่าความคล่องตัว (Mobility) ของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ

K_g เป็นค่าคงที่ที่มีความสัมพันธ์กับรูปร่างลักษณะของตัวอุปกรณ์

$$S_R = \frac{\Delta I_C}{I_O.\Delta B_Z} \tag{2.34}$$

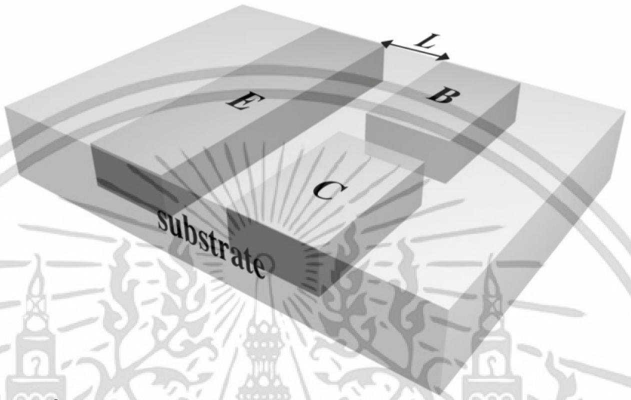
$$S_A = \frac{\Delta V}{\Delta B_Z} \tag{2.35}$$

เมื่อ I_O คือแหล่งจ่ายกระแสคงที่ และ ΔB_z คือการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

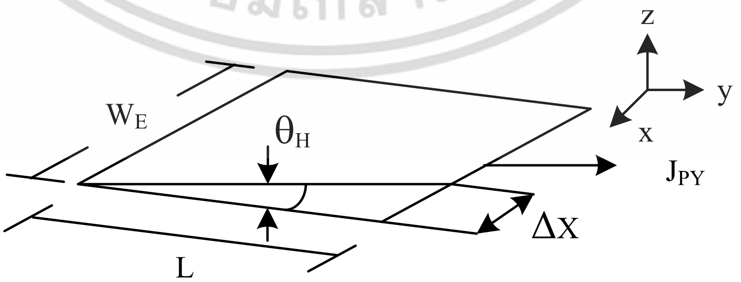
2.2.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (Three terminal magnetotransistor)

โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาแสดงดังรูปที่ 2.10 เป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ pnp ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน ประกอบด้วย อิมิตเตอร์ E, เบส B และคอลเลคเตอร์ C โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาเป็นการพัฒนาจากโครงสร้างปกติห้าขาเพื่อสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวดิ่งและแนวนอน โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัวในเบสเป็นกระแสเบสและพาหะที่เบี่ยงเบนเป็นกระแสคอลเลคเตอร์ [18-22]



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบโครงสร้างสามขาในภาวะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กปริมาณพาหะโฮลเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ข้ามเบสไปยังคอลเลคเตอร์เป็นกระแสคอลเลคเตอร์เท่ากับปริมาณพาหะโฮลที่รวมตัว (recombination)ในเบสเป็นกระแสเบส แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตั้งฉากแนวดิ่ง (ทิศทาง z) ตัดผ่านตัวอุปกรณ์ พาหะถูกกระทำโดยแรงลอเรนซ์ ทำให้พาหะเบี่ยงเบนและเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ การวิเคราะห์การทำงานแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.11 โดยกระแสอิมิตเตอร์คือการรวมกันของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ดังสมการที่ (2.36)



รูปที่ 2.11 พื้นที่การเบี่ยงเบนของพาหะ (โฮล) ทำมุมเบี่ยงเบน θ_H

$$I_E = I_B + I_C \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสอิมิตเตอร์สามารถแสดงอยู่ในเทอมของปริมาณความหนาแน่นของโฮล J_{PY} ดังสมการ 2.37

$$I_E = J_{PY}.W_E.d \tag{2.37}$$

โดยที่ W_E คือความกว้างอิมิตเตอร์ และ d คือความลึกรอยต่อ

การไม่สมดุลของกระแสนั้นมีความสัมพันธ์กับความกว้างกว้างเบส W_B, สภาพความคล่องตัวของโฮล μ_p และความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก B_z ดังสมการที่ (2.39) กระแสไหลตามแนวนอนเบี่ยงเบนในมุม θ_H ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ (2.38)

$$\tan\theta_H = \mu_p.B_Z \tag{2.38}$$

$$(\Delta X) = L.\mu_p.B_Z \tag{2.39}$$

$$\Delta I_{CB} = J_{PY}.W_E.L.\tan\theta_H \tag{2.40}$$

การเปลี่ยนแปลงของกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์สามารถหาได้โดยสมการที่ 2.40 สามารถคำนวณโดยความหนาแน่นกระแส J_{PY} ในระนาบ $L = W_B$, ความกว้างอิมิตเตอร์ W_E และมุมเบี่ยงเบน $\tan\theta_H$ ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบสัมพัทธ์หาได้โดยสมการที่ 2.41

$$S_R = \frac{\Delta I_{CB}}{I_E \cdot \Delta B_Z} \tag{2.41}$$

แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวดิ่งและแนวนอน ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีผลของกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection)

2.3 คุณสมบัติทั่วไปของอุปกรณ์เซ็นเซอร์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ย่านวัด (Range)

เป็นการจำกัดค่าอินพุท และเอาท์พุทของเซนเซอร์ในการใช้งาน เช่นเซนเซอร์ที่ใช้วัดความดันตัวหนึ่งให้กับความดันอยู่ในช่วง 0 ถึง 7 บาร์ โดยให้กระแสด้านเอาท์พุท อยู่ในช่วง 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ เป็นต้น

2.3.2 ความผิดพลาด (Error)

เนื่องจากขั้นตอนดำเนินการ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด จะไม่สมบูรณ์แบบในทางปฏิบัติ ดังนั้นจะเกิดความแตกต่างขึ้นระหว่างผลที่ได้จากการวัด และค่าจริงของปริมาณที่ถูกวัด ความแตกต่างนี้เรียกว่า “ความผิดพลาด” ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถหาค่าผิดพลาดในการวัดอย่างแน่นอนได้ ดังนั้นผลที่ได้จากการวัดจึงมีความไม่แน่นอน (uncertainly) รวมอยู่ด้วยเสมอ

2.3.3 ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision)

ในการวัดค่า ความแม่นยำ และความเที่ยงตรง ถือว่าเป็นลักษณะจำเพาะของกระบวนการวัด ความแม่นยำ หมายถึง ค่าที่วัดได้เข้าใกล้ค่าจริงมากเพียงใด ในขณะที่ความเที่ยงตรง จะมีสองความหมาย ความหมายแรก หมายถึงสามารถวัดได้ละเอียด (sharp definition) อุปกรณ์วัดที่มีความละเอียดสูง หมายถึง สเกลที่แบ่งย่อยละเอียดมากทำให้สามารถอ่านค่าได้ละเอียด ในอีกความหมายหนึ่งของคำว่าเที่ยงตรงก็คือค่าที่วัดได้เข้าใกล้กันเพียงใด ในความหมายหลังนี้จะหมายถึงความคงเส้นคงวา (consistency) หรือความสามารถซ้ำค่าเดิม (repeatability) ของผลการวัด อุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง หมายถึง ค่าที่ได้จากการวัดจะมีการกระจายน้อยกว่าอุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงต่ำ

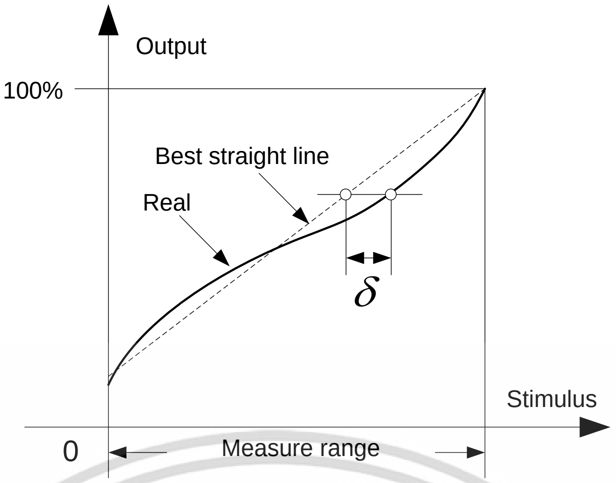
2.3.4 ความไว (Sensitivity)

ความไว หมายถึง อัตราส่วนของสัญญาณเอาท์พุทหรือการตอบสนองของอุปกรณ์วัดต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุท หรือค่าที่ถูกวัด เช่น อุปกรณ์วัดอุณหภูมิตัวหนึ่งซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานมีความไวเป็น 0.5 $\Omega/^{\circ}C$ เป็นต้น

2.3.5 ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) หรือความแม่นยำ โดยความเป็นเชิงเส้นจะแสดงค่าที่วัดได้ว่ามีการวางตัวอย่างไรบนสเกลที่เป็นเชิงเส้น และเป็นสัดส่วน สเกลอาจจะเป็นเชิงเส้นอย่างมากแต่มีความเอียง, ความชัน หรือออฟเซ็ท จากค่าที่ถูกกำหนด ดังรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



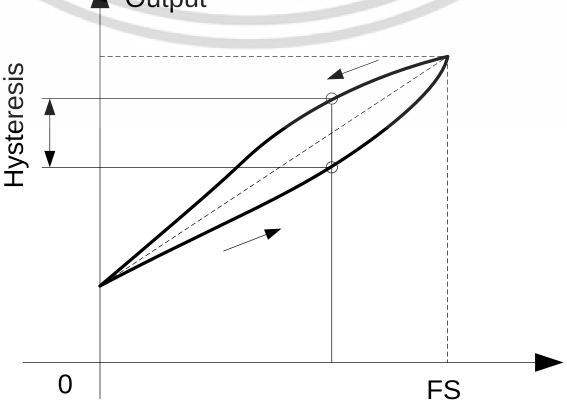
รูปที่ 2.12 ความไม่เป็นเชิงเส้นของกราฟ

2.3.6 ความมีเสถียรภาพ (Stability)

ความมีเสถียรภาพของอุปกรณ์วัด หมายถึง ความสามารถในการให้สัญญาณเอาท์พุทเดิม เมื่อใช้วัดสัญญาณอินพุทที่คงที่แม้เวลาจะเปลี่ยนแปลงไป คำว่า การคลาดเคลื่อนมักถูกนำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าของเอาท์พุทอันเนื่องมาจากเหตุการณ์ดังกล่าว การคลาดเคลื่อนอาจจะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์เต็มย่านวัดก็ได้ คำว่า การคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์เป็นศูนย์ถูกนำมาใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏขึ้นที่เอาท์พุท เมื่ออินพุทมีค่าเป็นศูนย์

2.3.7 ฮีสเตอร์รีซิส (Hysteresis)

การที่อุปกรณ์วัดให้ค่าสัญญาณเอาท์พุทที่แตกต่างไปจากค่าเดิมกล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงอาจมีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลงอย่างต่อเนื่อง ผลที่เกิดจากเหตุการณ์นี้เรียกว่า ฮีสเตอร์รีซีส ซึ่งค่าที่เกิดขึ้นนี้ถือว่าเป็นความผิดพลาด ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ฮีสเตอร์รีซีสสัญญาณเอาท์พุทที่แตกต่างไปจากค่าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.8 การแยกชัด (Resolution or Discrimination)

การแยกชัด บอกถึง คุณภาพซึ่งแสดงถึงลักษณะจำเพาะของความสามารถของอุปกรณ์วัดในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเล็กๆ ของปริมาณที่ถูกวัด

2.3.9 ออฟเซ็ท (Offset)

ออฟเซ็ท เป็นค่าเอาท์พุทของเซนเซอร์ ที่ไม่ต้องการที่อุณหภูมิห้อง หรือที่สัญญาณอินพุทเป็นศูนย์ ในกรณีของอุปกรณ์ฮอลล์ค่าออฟเซ็ท หมายถึง ค่าแรงดันฮอลล์ในขณะที่สนามแม่เหล็กเท่ากับศูนย์

2.3.10 ความเร็วในการตอบสนอง (Speed of Response)

ความเร็วในการตอบสนอง แสดงถึงเวลาที่เอาท์พุทมีค่าอยู่ใน 63 % ของค่าสุดท้ายที่ทำการการตอบสนองของอุปกรณ์เซนเซอร์ในการวัดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
โปรแกรม TCAD Sentaurus และการจำลองแบบ

เนื้อหาของบทนี้เราจะกล่าวถึงเครื่องมือที่สำคัญในการจำลองแบบการทำงาน และโปรแกรมการจำลองแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือโปรแกรม TCAD Sentaurus ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้เพื่อพัฒนาขั้นตอนกระบวนการสร้างหรือพัฒนาตัวอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำ

ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้เราจึงใช้โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการดำเนินการทดสอบ เพื่อศึกษากลไกและพัฒนาโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาให้สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนได้

3.1 บทนำ TCAD

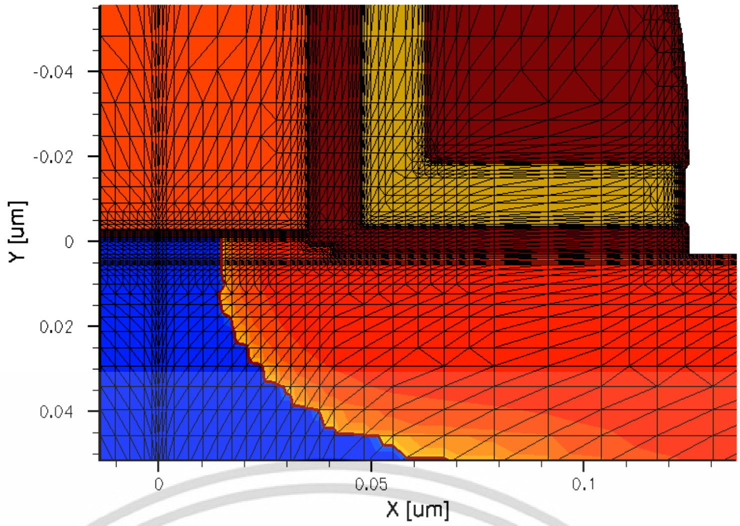
Technology Computer-Aided Design (TCAD) คือการใช้คอมพิวเตอร์จำลองเพื่อพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของเทคโนโลยีกระบวนการสร้างและอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ

การจำลองการทำงาน TCAD ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานด้านอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ (semiconductor Industry) ซึ่งเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำมีความซับซ้อนมาก จึงได้มีการใช้ TCAD เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มความเร็วในการค้นคว้าวิจัยหรือพัฒนาขั้นตอนกระบวนการสร้างที่เกี่ยวข้อง ผู้ผลิตตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor device) ใช้ TCAD ดูผลการทำงานของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบไว้ ก่อนที่จะนำไปสร้างเป็นตัวอุปกรณ์ โดย TCAD แสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบต่างๆ ที่เกี่ยงข้องกับตัวอุปกรณ์ เช่น โครงสร้าง, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ, สนามไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, การฉีดพาหะ และการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็ก TCAD ประกอบด้วยส่วนหลักๆอยู่ 2 ส่วนได้แก่ การจำลองการทำงานที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนกระบวนการสร้าง (process simulation) และการจำลองการทำงานที่เกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (device simulation)

3.1.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง (process simulation)

ในการจำลองแบบกระบวนการสร้างประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ เช่น etching, deposition, ion implantation, thermal annealing and oxidation ซึ่งเป็นการจำลองแบบที่อยู่บนพื้นฐานของสมการทางฟิสิกส์ ในส่วนของการจำลองแบบกระบวนการสร้างจะอยู่บนแผ่นฐานรอง เช่น ซิลิคอน จากนั้นส่วนของการจำลองแบบจะถูกเมส (mesh) หรือกริด (grid) และถูกแทนที่ด้วย finite-element structure เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป ซึ่งในส่วนการจำลองแบบกระบวนการสร้างแสดงในรูปที่ 3.1

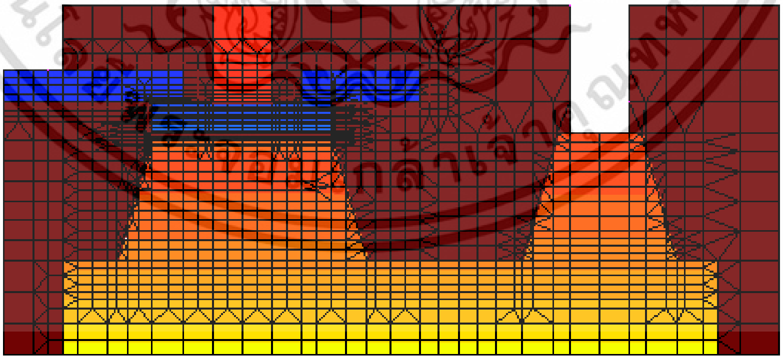
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง

3.1.2 การจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (device simulation)

ในการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ใน TCAD เราสามารถที่จะจำลองแบบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น คุณสมบัติทางแสงหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะถูกเมส จากนั้นจะถูกแทนที่ด้วย finite-element structure ซึ่งแต่ละโนดของตัวอุปกรณ์จะมีคุณสมบัติทางด้านต่างๆที่รวมกันอยู่ เช่น ชนิดของวัสดุ (material type), ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ (doping concentration), ความหนาแน่นกระแส (current density), สนามไฟฟ้า (electric field), อัตราการเกิดและการรวมตัวใหม่ (generation and recombination rates) และคุณสมบัติอื่นๆ ซึ่งแต่ละโนดคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ จะถูกนำมาคำนวณซึ่งแสดงในรูปที่ 3.2

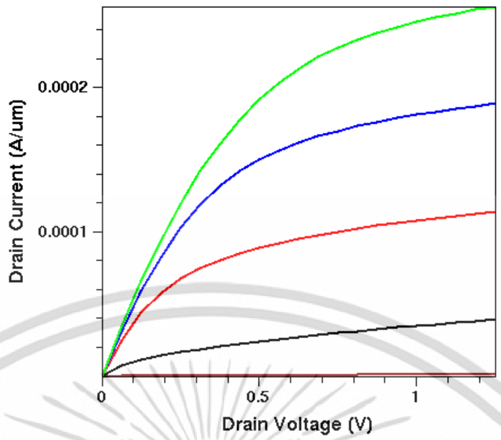


รูปที่ 3.2 การจำลองแบบตัวอุปกรณ์โดยการจำลองการทำงานด้วย TCAD

ในการจำลองแบบตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำขั้วไฟฟ้าจะถูกสร้างขึ้นและกำหนดเงื่อนไขขอบเขต เช่น แรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าเป็นต้น การจำลองแบบตัวอุปกรณ์ใน TCAD จะแก้ปัญหาสมการต่างๆมากมายที่เกี่ยวข้องกับการจำลองแบบ เช่น สมการปัวซอง (Poisson equation), สมการความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

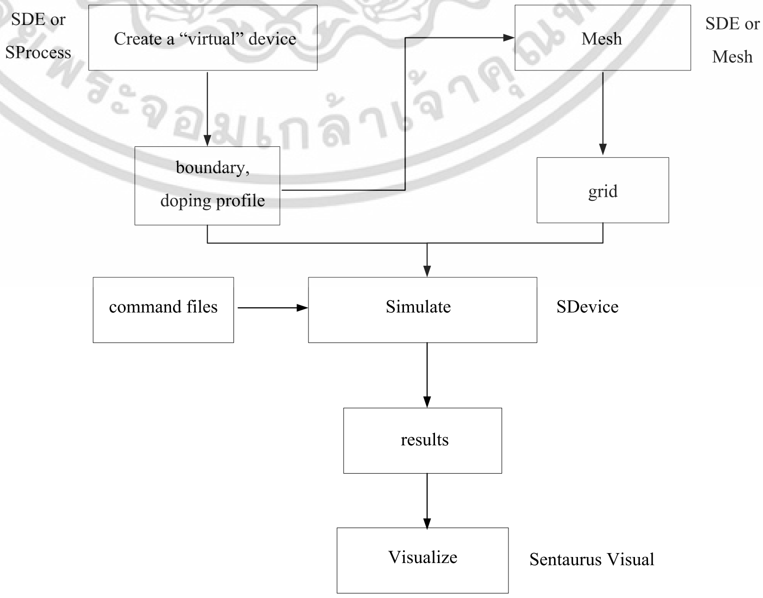
ต่อเนื่องของพาหะ (carrier continuity equation) และสมการอื่นๆ หลังจากการแก้สมการเหล่านี้ ผลของกระแสไฟฟ้าที่ได้จะถูกแสดงออกมาในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของการจำลองแบบการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

3.2 โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD

กระบวนการจำลองโดยทั่วไปจะเริ่มจากการสร้างโครงสร้างของอุปกรณ์ซึ่ง อาจจะมาจากการจำลองด้วย sprocess หรือ SDE ก็ได้ตามด้วยการสร้าง mesh ด้วย SDE หลังจากนั้นจึง นำโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ผ่านการ mesh แล้วไปจำลองหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป ผลลัพธ์ที่ได้สามารถแสดงได้โดย Sentaurus visual โปรแกรมส่วนใหญ่จะถูกสั่งงานจาก command file (นามสกลุ .cmd) ซึ่งเป็น text file ปกติที่สามารถสร้างและแก้ไขได้ด้วย text editor ทั่วไป แต่ชุดคำสั่ง ที่ใช้จะต่างออกไปในแต่ละโปรแกรมโดยรูปที่ 3.4 แสดงภาพรวมของการจำลองโดย TCAD



รูปที่ 3.4 ภาพรวมของการจำลองโดย TCAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD มีส่วนประกอบ 6 ส่วนดังนี้

3.2.1 Sentaurus Workbench

3.2.2 Sentaurus Process

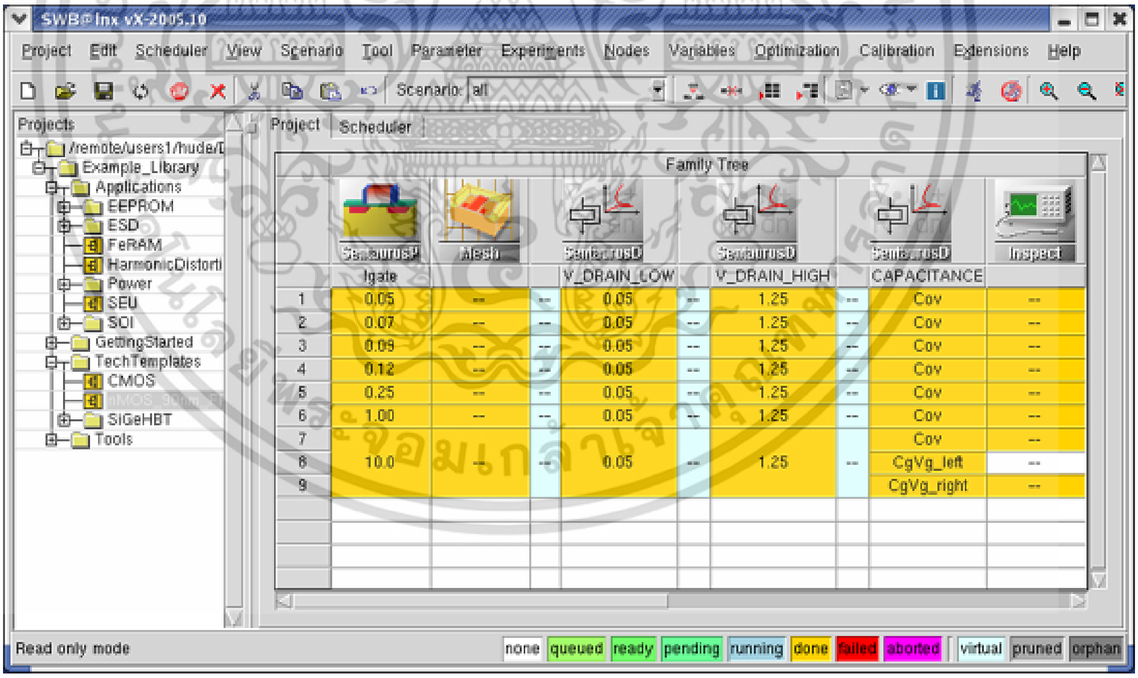
3.2.3 Sentaurus Structure Editor

3.2.4 Sentaurus Device

3.2.5 Sentaurus Visual

3.2.1 Sentaurus Workbench (SWB)

เป็น graphic user interface ที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์รวมของโปรแกรมต่างๆของ TCAD การสั่งงาน tool ต่างๆและการกำหนด Tool flow ก็จะทำผ่านโปรแกรมนี้เช่น การจำลองแบบกระบวนการสร้าง (Sentaurus Process) [23], การจำลองแบบตัวอุปกรณ์ (Sentaurus Device) [24] และเครื่องมือในการวิเคราะห์ (Inspect) เป็นต้น โดยโปรแกรม Sentaurus Workbench สามารถให้ผู้ใช้กำหนดและเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามที่ต้องการได้เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการจำลองการทำงาน โดย TCAD ในส่วนของ Sentaurus Workbench แสดงดังรูปที่ 3.5

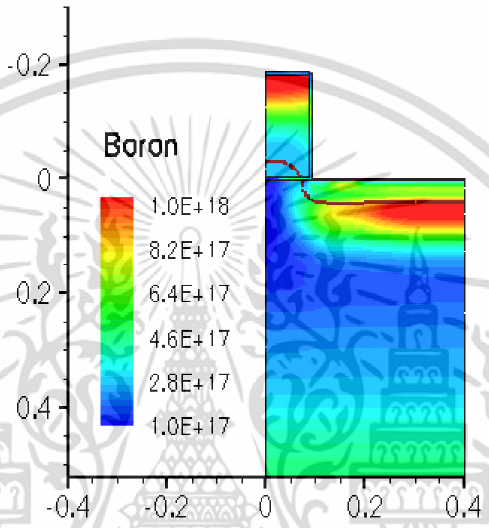


รูปที่ 3.5 หน้าต่างการทำงานของ Sentaurus Workbench

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 Sentaurus Process (sprocess)

Sentaurus Process เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับจำลองการทำงานที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนกระบวนการสร้าง เช่น etching, deposition, ion implantation, thermal annealing and oxidation ซึ่งใน Sentaurus Process จะใช้คำสั่งในการจำลองแบบการทำงานซึ่งจะประกอบไปด้วยคำสั่งต่างๆ เช่น การกำหนดชนิดและตำแหน่งฐานรอง, กระบวนการออกซิเดชั่น (oxidation) หรือกระบวนการยิงฝังประจุ (implantation) เป็นต้น โดยรูปที่ 3.6 แสดงกระบวนการจำลองแบบการยิงฝังประจุ



รูปที่ 3.6 การยิงฝังประจุใน Sentaurus Process

3.2.3 Sentaurus Structure Editor

เป็นโปรแกรมสร้างโครงสร้างของอุปกรณ์โดยการเลียนแบบโครงสร้างจริงด้วยรูป ทรงเรขาคณิตและยังทำหน้าที่เป็นตัวกลางเรียกโปรแกรมสำหรับสร้าง mesh เพื่อใช้ในการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป Sentaurus Structure Editor [25] เป็นส่วนของการออกแบบรูปร่างตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโดยสามารถที่จะทำการจำลองแบบรูปร่างและขนาดของตัวอุปกรณ์ทั้ง 2 มิติและ 3 มิติ โดยขั้นตอนแรกของการจำลองการทำงานทั้งในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เราจะทำการสร้างรูปร่างของตัวอุปกรณ์ เช่น สี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangles), รูปหลายเหลี่ยม (polygons), ลูกบาศก์ (cuboids), รูปทรงกระบอก (cylinders), รูปทรงกลม (spheres) และรูปต่างๆ เป็นต้น ซึ่งรูปร่างและโครงสร้างที่มีความซับซ้อนเกิดจากรูปร่างง่ายๆเหล่านี้ ซึ่งจะออกแบบผ่านใน command file หรือออกแบบผ่าน Ligament ก็ได้โดยในที่นี้เลือกการออกแบบผ่าน Ligament

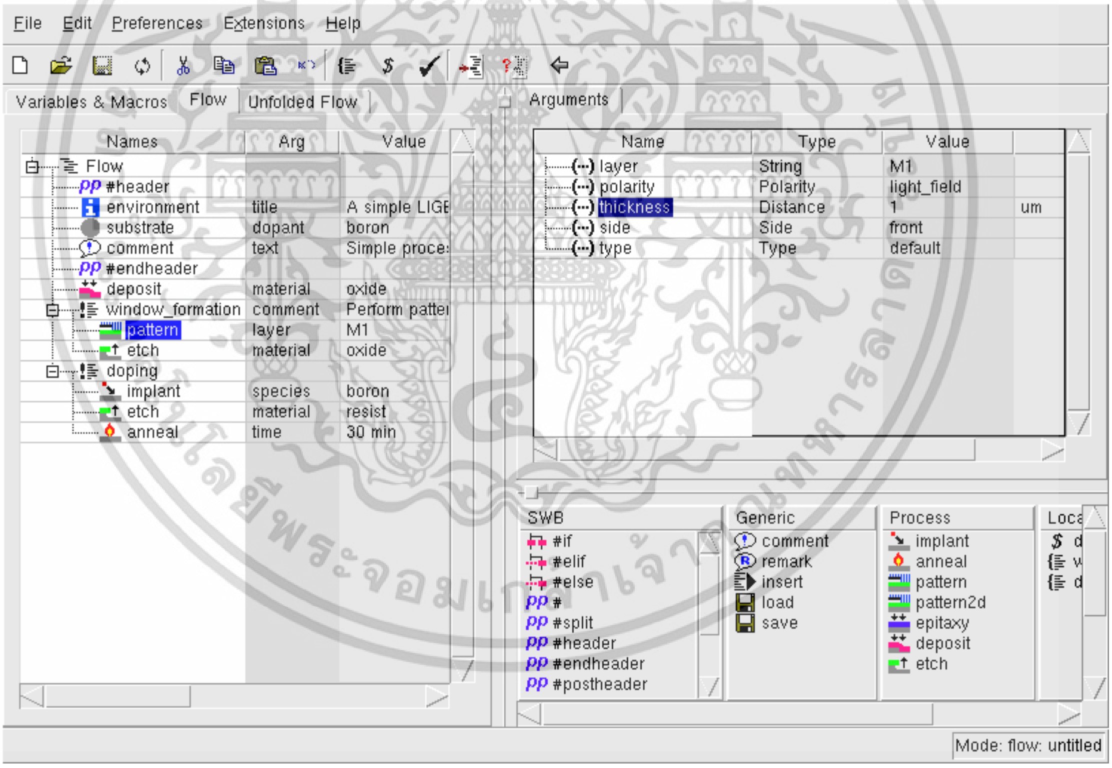
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.1 Ligament

Ligament คือหนึ่งในตัวช่วยในการออกแบบโครงสร้างของตัวอุปกรณ์โดยส่วนของ Ligament ประกอบไปด้วย 2 ส่วนดังนี้ Ligament Flow Editor และ Ligament Layout Editor โดยจะทำงานร่วมกันเพื่อให้ได้โครงสร้างของอุปกรณ์ตามที่ต้องการ

- **Ligament Flow Editor**

เป็นเครื่องมือใน Ligament ที่ช่วยในการกำหนดกระบวนการสร้างต่างๆของตัวอุปกรณ์ทั้งหมดตามที่ได้ออกแบบไว้เช่น etching, deposition, ion implantation, thermal annealing และ oxidation โดยที่ในแต่ละกระบวนการผลิตเราสามารถที่จะกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆของกระบวนการได้ เช่น การกำหนดระนาบ, ชนิด, ขนาดของแผ่นฐานรองซิลิคอน การกำหนดมุมของการยิงประจุ การกำหนดอุณหภูมิการแพร่รวมถึงกำหนดความเข้มข้นอะตอมสารเจือและระยะความลึกของรอยต่อ เป็นต้น รูปที่ 3.7 แสดงหน้าต่างการทำงานของ Ligament Flow Editor



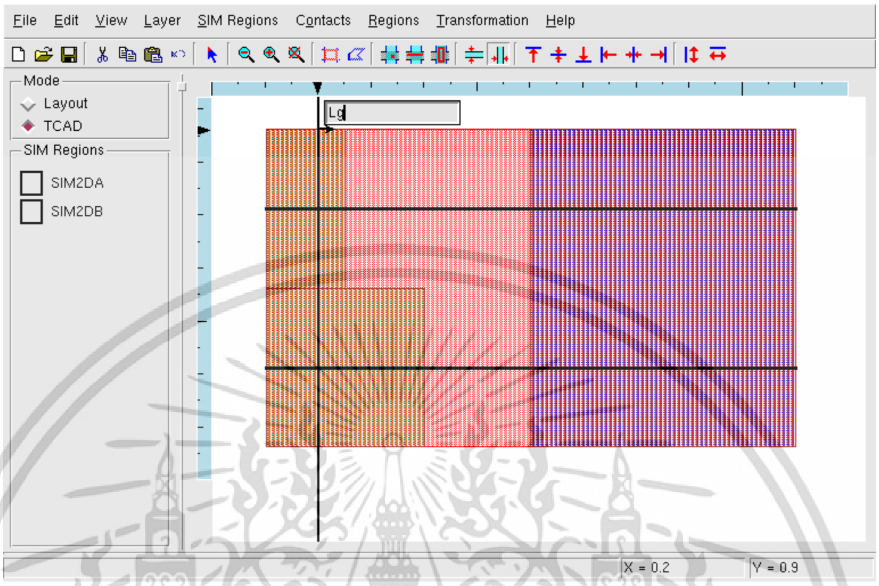
รูปที่ 3.7 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Flow Editor

- **Ligament Layout Editor**

เป็นเครื่องมือใน Ligament ที่ช่วยในการออกแบบส่วนประกอบต่างๆ ของตัวอุปกรณ์เสมือนกับการออกแบบกระจกต้นแบบ โดยที่เราสามารถกำหนดขอบเขตของการจำลองได้ว่าจะจำลองแบบ 2 มิติหรือ 3 มิติ รวมถึงการเปลี่ยนรูปร่างของอุปกรณ์ สามารถทำได้โดยไม่ต้องออกแบบใหม่เพียงใช้

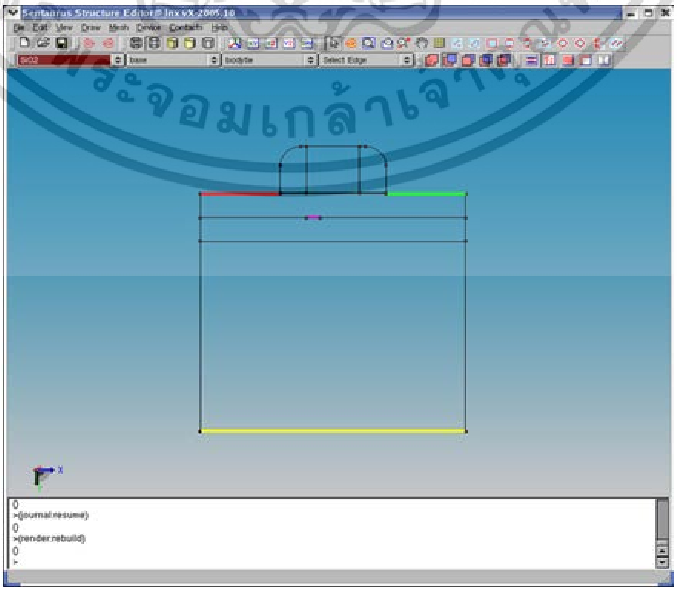
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นพารามิเตอร์ตัดผ่านส่วนที่ต้องการ และกำหนดค่าในหน้า Sentaurus Workbench รูปร่างของอุปกรณ์จะเปลี่ยนไปตามที่เราออกแบบรูปที่ 3.8 แสดงหน้าต่างการทำงานของ Ligament Layout Editor



รูปที่ 3.8 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Layout Editor

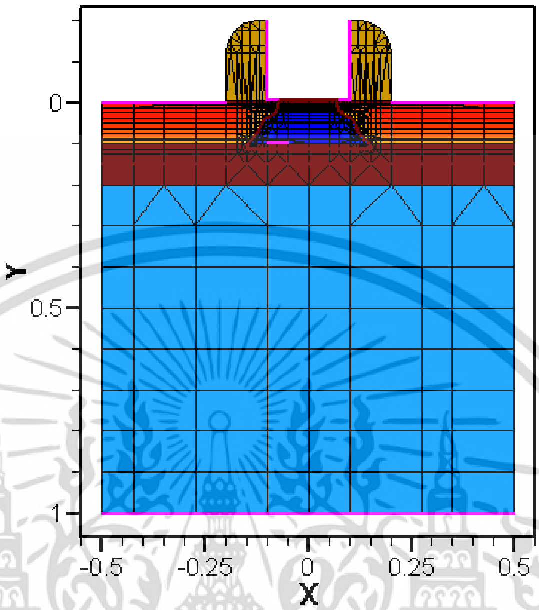
ในส่วนการจำลองแบบทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ เราต้องกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดกระแสและแรงดันจากภายนอกโดยหลังจากกำหนดหน้าสัมผัสแล้วจะแสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ตัวอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งส่วนหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดจะแสดงเส้นสีเกิดขึ้นตามคุณสมบัติหน้าสัมผัสที่ตั้งไว้



รูปที่ 3.9 หน้าสัมผัสไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ในการจำลองการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นจะเป็นการสร้างเมส (mesh) ให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการจำลองการทำงานสามารถที่จะแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้ รูปที่ 3.10 แสดงการจำลองแบบตัวอุปกรณ์หลังจากการสร้างรูปร่างตัวอุปกรณ์และสร้างเมสเสร็จแล้ว



รูปที่ 3.10 การจำลองตัวอุปกรณ์หลังจากการสร้างเมส

หลังจากสร้างเมสจากนั้นก็จะเข้าสู่ในส่วนของการกำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ ซึ่งอยู่ในส่วนของ Sentaurus Device

3.2.4 Sentaurus Device

Sentaurus Device เป็นหนึ่งในโปรแกรมที่ใช้จำลองแบบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical), ความร้อน (thermal) หรือแสง (optical) ในตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งในคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้จะประกอบด้วยโมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆมากมายที่เราสามารถที่จะนำมาใช้กับตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำหรือคุณสมบัติต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสภาพเงื่อนไขในการจำลองแบบ Sentaurus Device จึงถูกใช้ในการประเมินตัวอุปกรณ์และเพื่อความเข้าใจในการทำงานของตัวอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์ภายใต้คุณสมบัติต่างๆทำงานได้ดีที่สุด ในส่วน Sentaurus Device ประกอบด้วยคำสั่งต่างๆมากมาย เช่น

3.2.4.1 File

3.2.4.2 Electrode

3.2.4.3 Physics

3.2.4.4 Plot

3.2.4.5 Solve

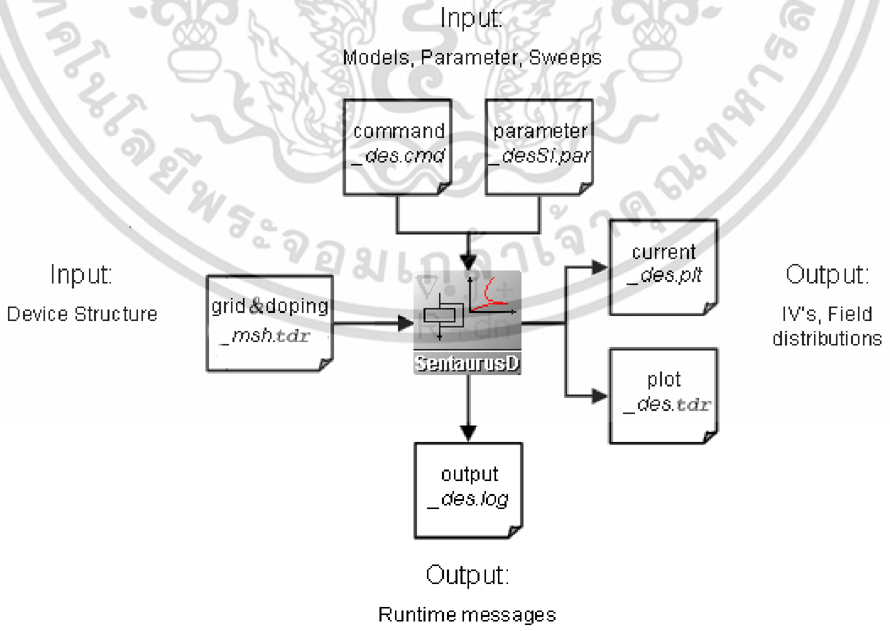
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.1 File

ในส่วน file จะเป็นการกำหนดไฟล์อินพุต และเอาต์พุต ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน เช่น

```
File {
* Input Files
Grid = "nmos_msh.tdr"
* Output Files
Current = "n1_des.plt"
Plot = "n1_des.tdr"
}
```

ในส่วนของ Input Files จะเป็นไฟล์ที่ได้หลังจากการสร้าง Sentaurus Structure Editor เสร็จแล้ว เช่น รูปร่างของตัวอุปกรณ์ก็จะประกอบไปด้วยขนาดและวัสดุที่ใช้ในการสร้างตัวอุปกรณ์, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ, ลักษณะการโด๊ป, ตำแหน่งของหน้าสัมผัสไฟฟ้า และขนาดของการแบ่งกริด (grid) หรือเมส (mesh) เพื่อใช้ในการคำนวณ และในส่วน Output Files ก็จะประกอบไปด้วยข้อมูลต่างๆที่ต้องการหลังจาก Sentaurus Device ดำเนินการเสร็จแล้ว ซึ่งไฟล์เอาต์พุตเหล่านี้ก็จะประกอบด้วยโมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณแล้ว เช่น ไฟล์ Current ก็จะประกอบไปด้วยข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า เป็นต้น ส่วนไฟล์ _des.log เราใช้สำหรับตรวจสอบข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งไฟล์อินพุต เอาต์พุต ต่างๆแสดงดังในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แผนผังไฟล์อินพุทและเอาท์พุทใน Sentaurus Device

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.2 Electrode

ในส่วนของ Electrode เป็นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ให้กับหน้าสัมผัสไฟฟ้า ซึ่งแต่ละหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดอยู่ที่นี่จะต้องสอดคล้องกับชื่อหน้าสัมผัสที่ถูกกำหนดไว้ใน Sentaurus Structure Editor ในส่วนของ Electrode เราสามารถที่จะกำหนดคุณสมบัติของหน้าสัมผัสไฟฟ้าเช่น แรงดัน, กระแส, หน้าสัมผัสไฟฟ้าแบบช็อตกี้, และคุณสมบัติอื่นๆ เช่น

```
Electrode {
{ Name="source"  Voltage=0.0 }
{ Name="drain"   Voltage=0.0 Resistor=100}
{ Name="gate"    Voltage=0.0 Barrier=-0.55}
{ Name="base"    Voltage=0.0 Current=0 Barrier=-0.55}
{ Name="HEMTgate" Voltage=0.0 Schottky Barrier=0.78}
}
```

3.2.4.3 Physics

ในส่วนของ Physics จะเป็นส่วนที่โมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองการทำงานจะถูกนำมาประกาศไว้ในส่วนนี้ ซึ่งตัวอย่างของโมเดลทางฟิสิกส์ เช่น โมเดลที่เกี่ยวกับสภาพคล่องของพาหะ (carrier mobility model), การเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะ (band-gap narrowing model), การไอออไนซ์เนื่องจากการชน (impact ionization model) เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างโมเดลทางฟิสิกส์เช่น

```
Physics {
  Mobility( DopingDep HighFieldSat )
  }
```

ซึ่ง DopingDep หมายถึง การลดลงของสภาพคล่องของพาหะ เนื่องจากความเข้มข้นอะตอมสารเจือ HighFieldSat หมายถึง ความเร็วอิ่มตัวของพาหะ (velocity saturation) เมื่ออยู่ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูง model ที่ใช้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ (CMOS, Diode, BJT ฯลฯ) และส่งผลมากต่อความแม่นยำของผลลัพธ์และเวลาที่ใช้ในการจำลอง

3.2.4.4 Plot

ในส่วน Plot เป็นส่วนที่เราใช้สำหรับดูการเปลี่ยนแปลงต่างๆที่เกิดขึ้นหลังจากทำการจำลองในส่วนของ Sentaurus Device เสร็จ โดยเราสามารถที่จะกำหนดในสิ่งที่เราต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทราบได้ เช่น ความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนหรือโฮล, ศักย์ไฟฟ้า, สนามไฟฟ้า, โมบิลิตี้, ความเร็วของพาหะหรือ ความเข้มข้นสารเจือ เป็นต้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงต่างๆที่ได้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงหลังจากการดำเนินการในส่วนของ Sentaurus Device เสร็จแล้วซึ่งถูกเก็บไว้ในไฟล์เอาต์พุตในส่วนของ File ที่กล่าวไว้ในตอนต้น ซึ่งตัวอย่างในส่วนของ Plot เช่น

```
Plot {
 eDensity  hDensity  eCurrent  hCurrent
 Potential  SpaceCharge  ElectricField
 eMobility  hMobility  eVelocity  hVelocity
 Doping  DonorConcentration   AcceptorConcentration
}
```

3.2.4.5 Solve

ส่วนนี้เป็นส่วนที่กำหนดขั้นตอน การวัด คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ต้องการจำลอง โดยสามารถกำหนดได้ในกรอบของคำสั่ง Solve {...} โดยจะทำการจำลองเรียงกันไปตามลำดับที่ปรากฏใน Solve {...} เช่น

Coupled (Iterations=100) { Poisson } คือการหาคำตอบเริ่มต้นโดยแก้สมการ Poisson เพียงอย่างเดียว

Coupled { Poisson Electron Hole } คือการหาคำตอบเริ่มต้นของสมการ Drift-Diffusion ของ Electron และ Hole โดยเริ่มจากคำตอบเริ่มต้นในขั้นที่แล้ว

```
Quasistationary (
Initialstep=1e-2 Increment=1.4
Maxstep=0.025 Minstep=1.e-6
Goal { Name="anode" Voltage=@vstop@ }
){ Coupled { Poisson Electron Hole } }
```

เป็นการจำลองแบบ Quasistationary (DC) โดยค่อยๆเปลี่ยน (sweep) ศักย์ไฟฟ้าปัจจุบันจนถึงค่าที่กำหนดใน Goal { ... } แล้วเก็บค่ากระแสในแต่ละขั้นใน output file

ตัวอย่างด้านบนกำหนดให้จ่ายศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว anode ไปจนถึง @vstop@ (เป็นชื่อ parameter ที่สามารถกำหนดค่าใน SWB ได้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

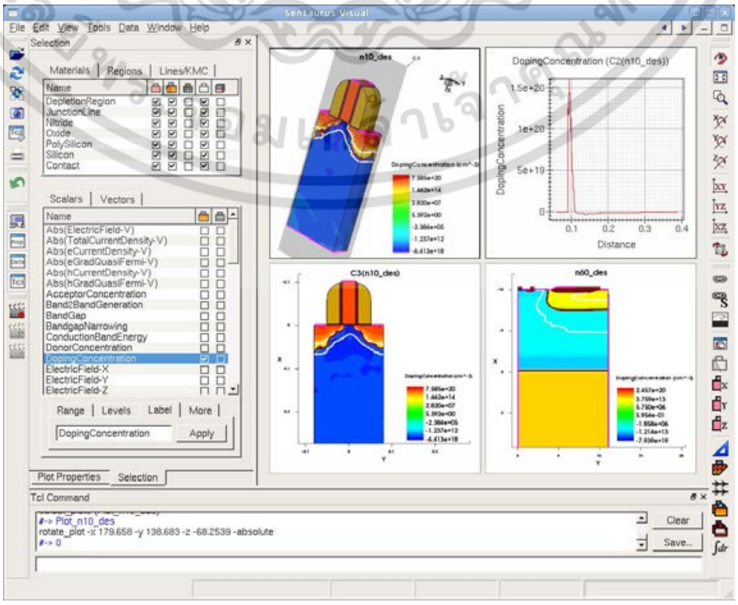
Step ของการ sweep ถูกกำหนดโดย Initialstep, Increment, Maxstep และ Minstep ค่า step ที่ใช้เพิ่มศักย์ไฟฟ้าสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

realstep = step x (vstop – vnow)

vstop คือค่าที่กำหนดใน Goal { ... }
vnow คือค่าปัจจุบันก่อนที่จะถึง Quasistationary { ... }
ตัวอย่างเช่นถ้าขณะนี้ที่ขั้ว anode มีศักย์ไฟฟ้า 0 โวลต์และต้องการ sweep ถึง 5 โวลต์ค่า Initialstep, Maxstep และ Minstep ดังตัวอย่างด้านบนจะหมายถึง 0.05, 0.125 และ 5e-6 โวลต์ตามลำดับส่วน Increment จะเป็นตัวคูณเพื่อเพิ่มค่า step ถ้า step ของ iteration รอบที่แล้วทำให้หาคำตอบของสมการได้ จุดประสงค์ของ Increment เพื่อลดระยะเวลาในการหาคำตอบในเงื่อนไขที่กำหนดใน Goal { ... }

3.2.5 Sentaurus Visual

Sentaurus visual เป็นซอฟแวร์ที่ใช้ดูผลจากการจำลองแบบ โดยสามารถแสดงโครงสร้างของอุปกรณ์ ทั้งแบบสองและสามมิติได้ Sentaurus visual สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ เช่น ความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนหรือโฮล, ศักย์ไฟฟ้า, สนามไฟฟ้า, โมบิลิตี้, ความเร็วของพาหะหรือความเข้มข้นสารเจือ เป็นต้น ซึ่งหน้าต่างหลักของ Sentaurus visual แสดงดังรูปที่ 3.12 จากรูปจะเห็นได้ว่า Sentaurus visual นอกจากจะแสดงโครงสร้างของอุปกรณ์แล้วยังสามารถแสดงผลการจำลองในรูปแบบของกราฟ XY ได้อีกด้วย เช่น การแสดงผล IdVd-curve, CV-curve, ปริมาณความหนาแน่นการแพร่, ปริมาณกระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 3.12 หน้าต่างของ Sentaurus visual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในงานวิจัยชิ้นนี้เราใช้โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD ในส่วนของการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อจำลองกลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาหลังจากนั้นจึงนำโครงสร้างไปพัฒนาเป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

3.3 การจำลองแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาโดย TCAD

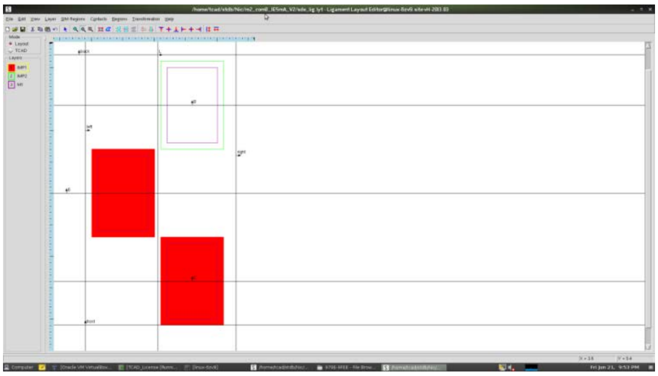
ในการจำลองแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา โครงสร้างจะประกอบไปด้วยขั้วอิมิตเตอร์ คอลเลคเตอร์และเบสอย่างละหนึ่งขั้ว โดยจะทำการไบอัสกระแสไฟฟ้าคงที่และให้สนามแม่เหล็กแก่ตัวอุปกรณ์ในแกน X, Y, Z เพื่อศึกษาผลของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแต่ละแกนว่าพาหะเคลื่อนที่อย่างไร และกระแสเอาท์พุทมีค่าเท่าไหร่ โดยโปรแกรมการจำลองแบบ TCAD จะมีส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการจำลองแบบ อยู่ 2 ส่วนได้แก่ 1. การออกแบบรูปร่างตัวอุปกรณ์ (Sentaurus Structure Editor) 2. การกำหนดโมเดลทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง (Sentaurus Device) ในส่วนนี้จะแสดงโครงสร้างที่ใช้ในการจำลองแบบในส่วนของ Sentaurus Structure Editor เท่านั้น ซึ่งในการจำลองแบบผู้ออกแบบต้องมีความรู้ความเข้าใจในเรื่องของกระบวนการสร้างก่อนจึงจะสามารถออกแบบได้

การจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา ด้วยโปรแกรม TCAD ในส่วนของ Sentaurus Structure Editor โดยโครงสร้างประกอบไปด้วยขั้วอิมิตเตอร์ คอลเลคเตอร์และเบสอย่างละหนึ่งขั้ว มีพื้นที่ของการฉีดพาหะ (Emitter Width) มีค่าเท่ากับ E และมีระยะการเบี่ยงเบนพาหะ (Deflection Length) มีค่าเท่ากับ L ทำการสร้างขั้วไฟฟ้าที่อิมิตเตอร์ เบสและคอลเลคเตอร์เพื่อเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกระแสภายนอก ซึ่งขั้นตอนการจำลองแบบโครงสร้างมีดังนี้

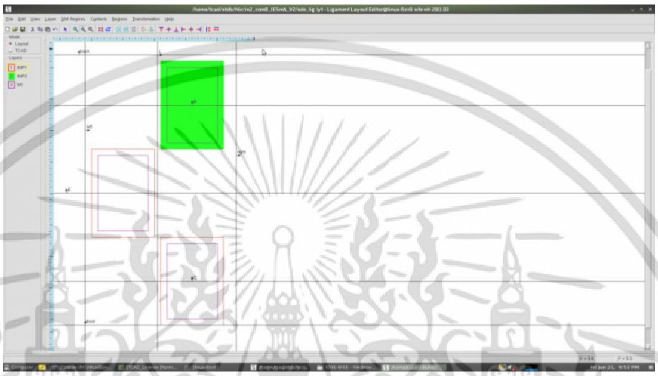
3.3.1 การออกแบบ layout ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา

ขั้นตอนแรกของการจำลองแบบการสร้างต้องทำการสร้าง layout ของอุปกรณ์ก่อน โดยการออกแบบสามารถทำได้ใน Ligament Layout โดยการจะใช้งาน ligament layout ได้นั้นต้องเลือกใช้ SDE ในหน้า workbench ก่อน จากนั้นจึงสามารถเลือกได้ว่าจะจำลองโครงสร้างแบบเป็นไฟล์คำสั่งหรือว่าใช้ไฟล์คำสั่งแบบ ligament พอหลังจากเลือกใช้ไฟล์คำสั่งแบบ ligament แล้วจึงจะสามารถใช้ ligament layout ได้ โดย ligament layout เป็นการจัดลำดับการทำส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์มีการทำงานคล้ายกับออกแบบลวดลายกระจกต้นแบบ (Mask) ในโปรแกรม L-edit ซึ่งสามารถนำไฟล์จากโปรแกรม L-edit ที่เป็นโปรแกรมสำหรับสร้างลวดลายบนกระจกต้นแบบมาใช้ใน ligament layout ได้อีกด้วย การสร้าง layout กำหนดให้ layer ที่ 1 คือส่วนของอิมิตเตอร์ (E) และคอลเลคเตอร์ (C) แสดงดังรูปที่ 3.13 (ก) layer ที่ 2 คือส่วนของเบส (B) แสดงดังรูปที่ 3.13 (ข) และสุดท้าย layer ที่ 3 คือส่วนของการทำชั้นโลหะแสดงดังรูปที่ 3.13 (ค)

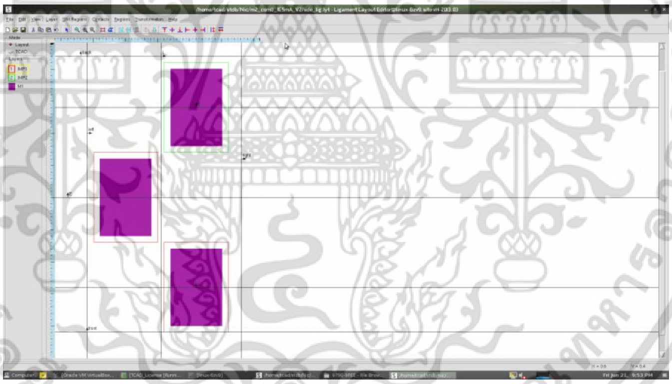
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.13 layer ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา (ก) layer ที่ 1 อิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ (ข) layer ที่ 2 เบส (ค) layer ที่ 3 ชั้นโลหะ

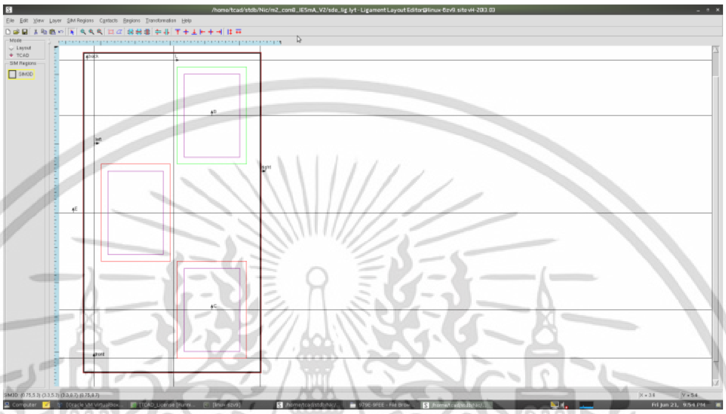
หลังจากการทำ layer ชั้นต่างๆ เสร็จแล้ว ต่อไปคือการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวอุปกรณ์ โดยชื่อของพารามิเตอร์เราสามารถตั้งได้เองตามที่ต้องการและพารามิเตอร์ที่ใช้มีดังนี้

- Front คือระยะห่างจากขอบด้านหน้าจนถึงขั้วของอุปกรณ์
- Back คือระยะห่างจากขอบด้านล่างจนถึงขั้วของอุปกรณ์
- Left คือระยะห่างจากขอบด้านซ้ายจนถึงขั้วของอุปกรณ์
- Right คือระยะห่างจากขอบด้านขวาจนถึงขั้วของอุปกรณ์
- E คือความกว้างของอิมิตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- L คือระยะการเบี่ยงเบนพาหะของขั้ว B-C
- B คือขนาดของขั้ว B
- C คือขนาดของขั้ว C

หลังจากการกำหนดพารามิเตอร์แล้ว สุดท้ายกำหนดขอบเขตในการจำลองแบบ 3 มิติ โดยจากรูป 3.14 กรอบสีดำเป็นการกำหนดบริเวณที่จะทำการจำลองในรูปแบบ 3 มิติ หลังจากกำหนดรูปแบบการจำลองแล้วก็เป็นอันเสร็จขั้นตอนของการออกแบบ layout ของอุปกรณ์



รูปที่ 3.14 เส้นพารามิเตอร์ของอุปกรณ์และเส้นขอบเขตการจำลองแบบ 3 มิติ

3.3.2 การกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา

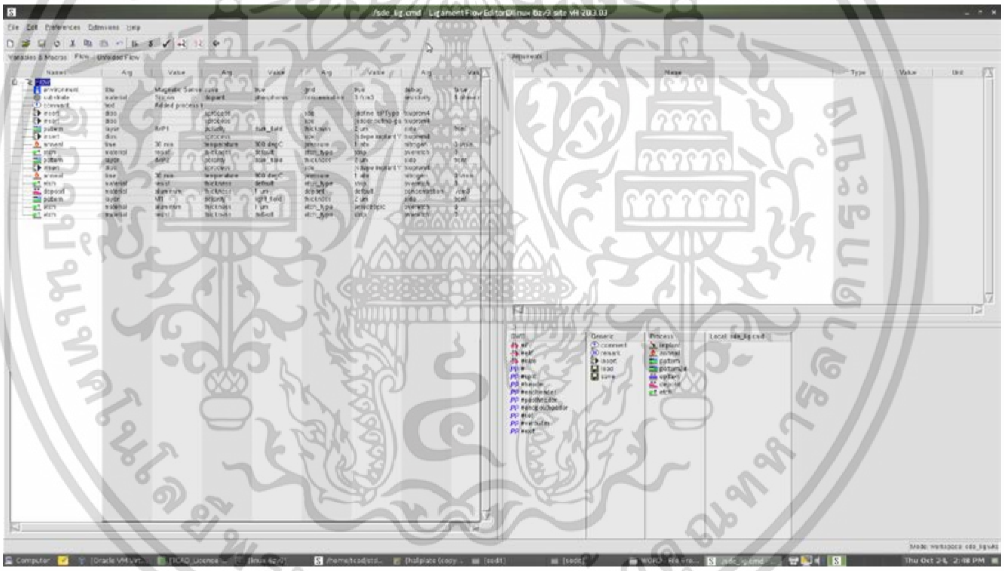
เมื่อทำการออกแบบ layout เสร็จเรียบร้อยแล้วต่อมาเราจะต้องกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้างของอุปกรณ์โดยใช้ ligament flow ช่วยในการกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้าง โดยการทำงานของ Ligament flow จะมีลำดับขั้นตอนการทำงานและรายละเอียดคร่าวๆ ดังต่อไปนี้

- Environment คือการกำหนดชื่อของอุปกรณ์และรูปแบบของการจำลองว่าจะจำลองแบบ 2 มิติหรือแบบ 3 มิติ
- Substrate คือการกำหนดค่าต่างๆของฐานรองโดยชนิดของฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น, ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ $7.68x10^{14}$ ค่าความต้านทาน 6 Ω-cm
- Comment คือการบอกรายละเอียดต่างๆ ซึ่งจะพิมพ์ลงไปหรือไม่พิมพ์ลงไปก็ได้
- Insert คือการเขียนคำสั่งลงไปเพื่อกำหนดความเข้มข้นอะตอมสารเจือและระยะความลึกของรอยต่อ
- Insert คือการเขียนคำสั่งลงไปเพื่อใช้กำหนดความเข้มข้นที่รอยต่อว่ามีค่าเท่าไหร่และกำหนดชื่อและชนิดของการยิงฝังประจุด้วยว่าเป็นแบบเอ็นหรือแบบพี
- Pattern คือการสร้าง layer ที่ 1 จาก ligament layout
- Insert คือการเขียนคำสั่งยิงฝังประจุพาหะด้วยสารเจือชนิดพีความเข้มข้น $1e^{20}$ $atom/cm^3$
- Anneal คือการอบแผ่นที่อุณหภูมิ $900^{\circ}C$ นาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Etch คือการกัดชั้น resist ออก
- Pattern คือการสร้าง layer ที่ 2 จาก ligament layout
- Insert คือการเขียนคำสั่งยิงฝังประจุพาหะด้วยสารเจือชนิดเอ็นความเข้มข้น $5e^{19}$ atom/cm^3
- Anneal คือการอบแผ่นที่อุณหภูมิ 900°C นาน 30 นาที
- Etch คือการกัดชั้น resist ออก
- Deposit คือการสร้างชั้นโลหะ
- Pattern คือการสร้าง layer ที่ 3 จาก ligament layout
- Etch คือการกัดชั้นโลหะตามลวดลายที่ออกแบบไว้
- Etch คือการกัดชั้น resist ออก

หลังจากกำหนดขั้นตอนใน ligament flow เสร็จเรียบร้อยแล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนถัดไปของการจำลองแบบคือ การสร้าง mesh และกำหนดหน้าสัมผัสทางไฟฟ้าของอุปกรณ์



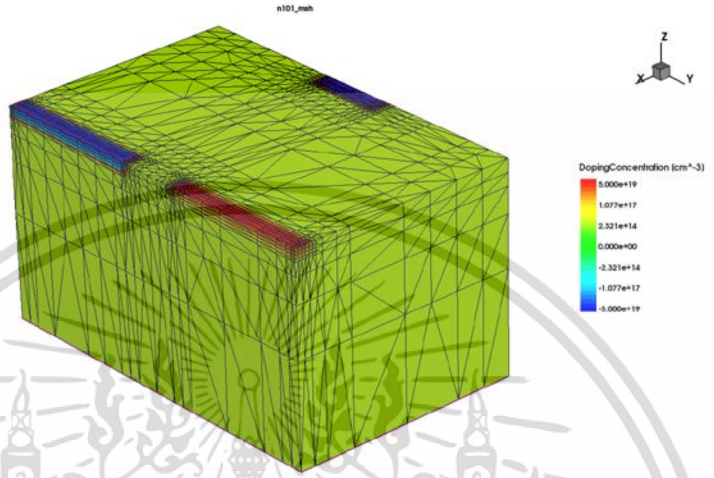
รูปที่ 3.15 การกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้างของอุปกรณ์ใน Ligament Flow

3.3.3 การสร้าง mesh และกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา

การสร้าง mesh เพื่อใช้สำหรับกำหนดขอบเขตในการคำนวณคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์จะถูกนำไปใช้ในส่วนของ sdevice โดยสามารถกำหนดได้สองแบบคือ การกำหนดแบบหยาบเป็นการกำหนดพื้นที่ในการคำนวณคุณสมบัติทางไฟฟ้าแบบหยาบครอบคลุมอุปกรณ์ที่ออกแบบตามรูปทรงเลขาคณิตทั้งหมด และการกำหนดแบบละเอียด (refinement box) โดยทำการเขียนคำสั่ง mesh แบบละเอียดในส่วนสำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าเช่น บริเวณรอยต่อและบริเวณขั้วต่างๆของอุปกรณ์ เพื่อสำหรับการคำนวณที่ออกมาจะได้ค่าที่เป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

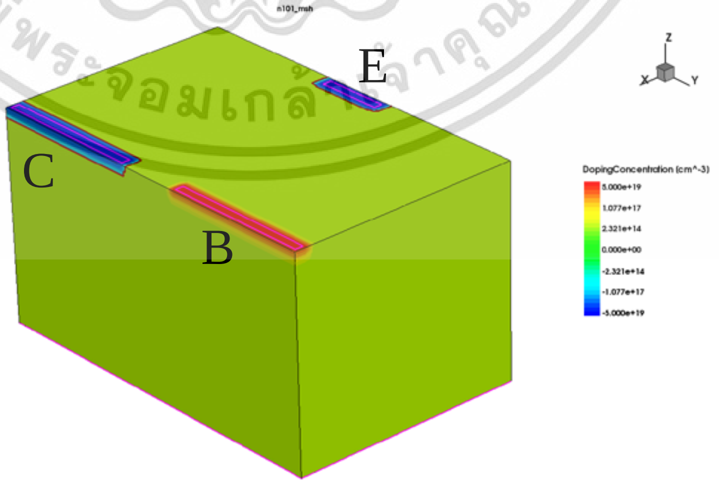
การออกแบบได้ตามต้องการ จากนั้นทำการกำหนดชื่อขั้ว (contract) และบริเวณของอุปกรณ์เพื่อใช้สำหรับการคำนวณทางฟิสิกส์ต่อไป ซึ่งรายละเอียดต่างๆของการสร้าง mesh และหน้าสัมผัสไฟฟ้าจะอยู่ในส่วนของภาคผนวก โดยรูปที่ 3.16 แสดงโครงสร้างหลังจากทำการ mesh และกำหนดหน้าสัมผัสทางไฟฟ้าเสร็จเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.16 การสร้าง mesh และการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา

3.3.4 โครงสร้างในการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา

หลังจากกำหนดโครงสร้างใน Sentaurus Structure Editor ให้มีขนาดและวัสดุที่ต้องการเรียบร้อยแล้ว เราก็จะได้โครงสร้างของอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.17 โดยประกอบไปด้วยขั้วอิมิตเตอร์ เบสและคอลเลคเตอร์ โดยที่แถบสีจะแสดงความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของอุปกรณ์



รูปที่ 3.17 โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาที่ใช้ในการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

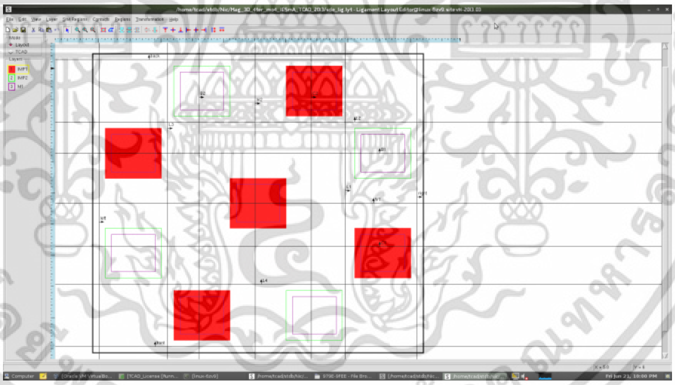
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การจำลองแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนโดย TCAD

เราจะนำโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขามาพัฒนาเพื่อใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนซึ่งมีโครงสร้างคล้ายกับการนำแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา 4 ตัวมาต่อรวมกันโดยใช้อิมิตเตอร์ร่วมกันแต่ขั้วเบสและคอลเลคเตอร์แยกจากกัน ดังนั้นโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนจะประกอบไปด้วยขั้วอิมิตเตอร์ 1 ขั้ว ขั้วคอลเลคเตอร์และเบสอย่างละ 4 ขั้ว ทำการไบอัสและให้สนามแม่เหล็กแก่ตัวอุปกรณ์ในแกน x, y, z เพื่อศึกษาผลของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแต่ละแกนว่าพาหะเคลื่อนที่อย่างไร และกระแสเอาท์พุทมีค่าเท่าไหร่ ซึ่งจะใช้หลักการสร้างเหมือนแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาดังนี้

3.4.1 การออกแบบ layout ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

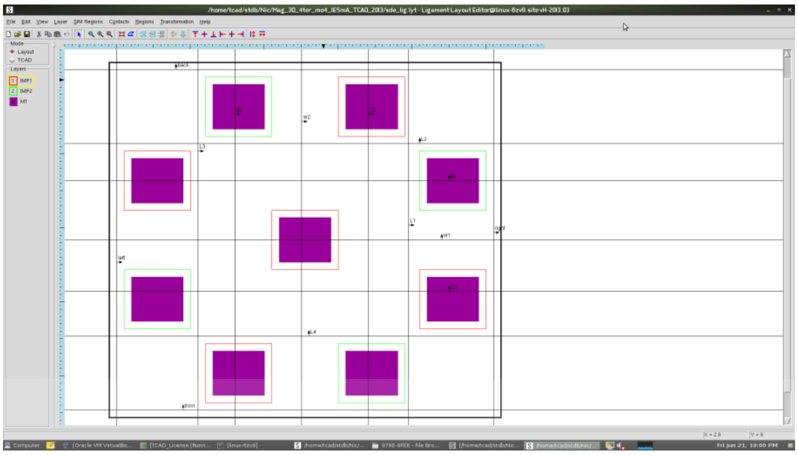
ขั้นตอนในการจำลองโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนจะเหมือนกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาแต่ต่างกันที่จำนวนขั้วคอลเลคเตอร์และเบสที่เพิ่มเข้ามา โดยกำหนดให้ layer ที่ 1 คือส่วนของอิมิตเตอร์ (E) และคอลเลคเตอร์ (C) แสดงดังรูปที่ 3.18 (ก) layer ที่ 2 คือส่วนของเบส (B) แสดงดังรูปที่ 3.18 (ข) และสุดท้าย layer ที่ 3 คือส่วนของการทำชั้นโลหะแสดงดังรูปที่ 3.18 (ค)



(ก)

(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

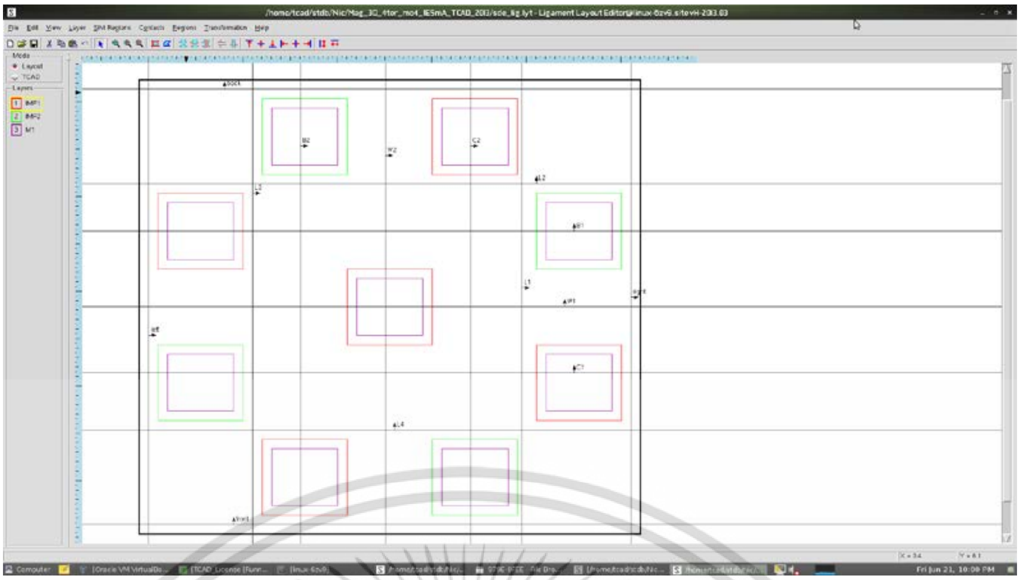
รูปที่ 3.18 layer ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน (ก) layer ที่ 1อิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ (ข) layer ที่ 2 เบส (ค) layer ที่ 3 ชั้นโลหะ

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้มีดังต่อไปนี้

- Front คือระยะห่างจากขอบด้านหน้าจนถึงขั้วของอุปกรณ์
- Back คือระยะห่างจากขอบด้านล่างจนถึงขั้วของอุปกรณ์
- Left คือระยะห่างจากขอบด้านซ้ายจนถึงขั้วของอุปกรณ์
- Right คือระยะห่างจากขอบด้านขวาจนถึงขั้วของอุปกรณ์
- W1 คือความกว้างของอิมิตเตอร์
- W2 คือความกว้างของอิมิตเตอร์
- L1 คือระยะการเบี่ยงเบนพาหะของขั้ว B1-C1
- L2 คือระยะการเบี่ยงเบนพาหะของขั้ว B2-C2
- L3 คือระยะการเบี่ยงเบนพาหะของขั้ว B3-C3
- L4 คือระยะการเบี่ยงเบนพาหะของขั้ว B4-C4
- B1 คือขนาดของขั้ว B1 และ C3
- C1 คือขนาดของขั้ว C1 และ B3
- B2 คือขนาดของขั้ว B2 และ C4
- C2 คือขนาดของขั้ว C2 และ B4

หลังจากการกำหนดพารามิเตอร์แล้ว สุดท้ายกำหนดขอบเขตในการจำลองแบบ 3 มิติ โดยจากรูปที่ 3.19 จะแสดงเส้นพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ที่กำหนดไว้และกรอบสีดำที่เป็นบริเวณจำลองในรูปแบบ 3 มิติ หลังจากกำหนดรูปแบบการจำลองแล้วก็เป็นอันเสร็จขั้นตอนของการออกแบบ layout ของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 เส้นพารามิเตอร์ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนและเส้นขอบเขตการจำลองแบบ 3 มิติ

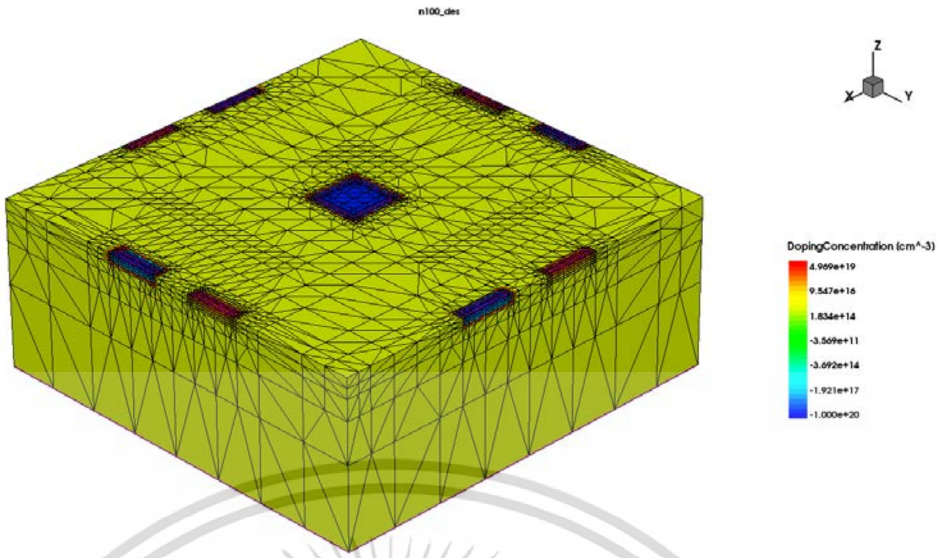
3.4.2 การกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

เมื่อทำการออกแบบ layout เสร็จเรียบร้อยแล้ว จะต้องกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้างของอุปกรณ์โดยใช้ ligament flow ในขั้นตอนกระบวนการสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนนั้น จะใช้ขั้นตอนกระบวนการสร้างเหมือนกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาในหัวข้อ 3.3.2 ดังนั้นในส่วนนี้จะไม่ขออธิบายซ้ำอีก

3.4.3 การสร้าง mesh และกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

เราจะทำการเขียนคำสั่งสำหรับ mesh และ refinement box ในส่วนสำคัญเช่น บริเวณรอยต่อและบริเวณขั้วต่างๆของอุปกรณ์ เพื่อสำหรับการคำนวณที่ออกมาจะได้มีความเที่ยงตรง หลังจากนั้นเราจะทำการกำหนดชื่อขั้วและบริเวณของอุปกรณ์เพื่อใช้สำหรับการคำนวณทางฟิสิกส์ต่อไป ซึ่งรายละเอียดต่างๆของการสร้าง mesh และหน้าสัมผัสไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน จะอยู่ในส่วนของภาคผนวก เมื่อกำหนดรูปแบบโครงสร้างและขั้นตอนกระบวนการสร้างเสร็จแล้วต่อมาเราจะทำการสร้าง mesh ให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์สามารถแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทำการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าและขั้วที่ต้องการจะพิจารณาดังแสดงในรูปที่ 3.20

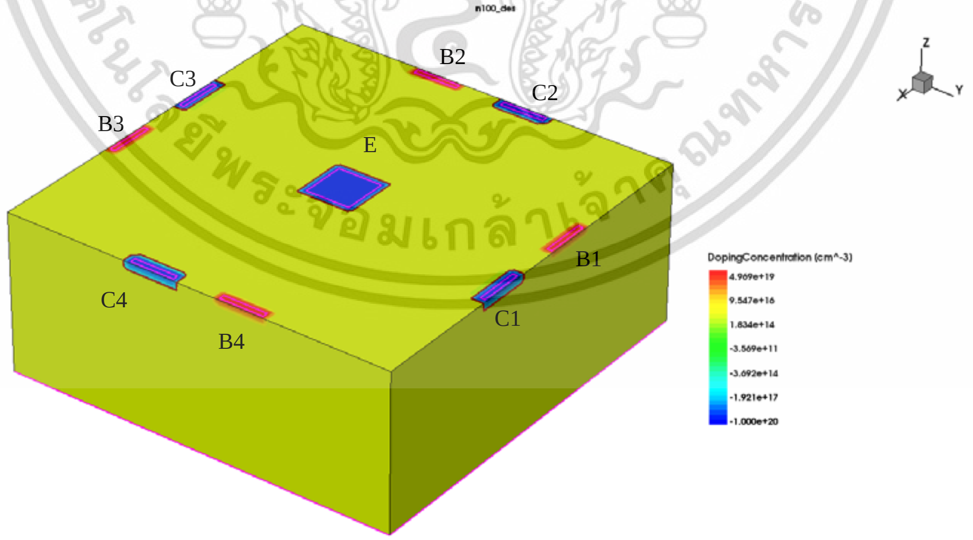
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 การสร้าง mesh และการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

3.4.4 โครงสร้างในการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

หลังจากกำหนดโครงสร้างใน Sentaurus Structure Editor ให้มีขนาดและวัสดุที่ต้องการเรียบร้อยแล้ว เราก็จะได้โครงสร้างของอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.21 โดยโครงสร้างประกอบไปด้วยขั้ว E, C1, B1, C2, B2, C3, B3, C4 และ B4 โดยที่แถบสีจะแสดงความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของอุปกรณ์



รูปที่ 3.21 โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การกำหนดแบบจำลองปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง

การจำลองแบบทางฟิสิกส์เป็นการจำลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดัน และปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ต่างๆ โดยขึ้นอยู่กับโมเดลที่เลือกใช้งาน โดยแต่ละโมเดลมีการจำลองปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ และส่งผลมากต่อความแม่นยำของผลลัพธ์และเวลาที่ใช้ในการจำลอง ซึ่งโมเดลที่ใช้ในการจำลองแบบในงานวิจัยนี้คือ สภาพคล่องของพาหะ, การรวมตัวใหม่แบบออเจอร์, ผลกระทบของสนามแม่เหล็ก,การรวมตัวบนพื้นผิวของพาหะของ Schockley-read-hall โดยการจำลองการทำงานนี้จะอยู่ในส่วนของ sdevice [24]

```
Physics {
    EffectiveIntrinsicDensity( Slotboom )
  Mobility (DopingDep(Masetti))
   !(puts $HFS1)!
   !(puts $HFS2)!
  )
```

เป็นการจำลองปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์เกี่ยวกับสภาพคล่องของพาหะแบบ Masetti ซึ่งเป็นโมเดลที่ให้กับฐานรองซิลิคอน ดังนั้นสมการสภาพคล่องพาหะบนฐานรองซิลิคอน (μ_{dop}) แสดงดังสมการที่ 5.2

$$\mu_{dop} = \mu_{\min 1} \exp\left(-\frac{P_c}{N_{A,0}+N_{D,0}}\right) + \frac{\mu_{const}-\mu_{\min 2}}{1+((N_{A,0}+N_{D,0})/C_r)^{\alpha}} - \frac{\mu_1}{1+(C_s/(N_{A,0}+N_{D,0}))^{\beta}} \quad (3.1)$$

เมื่อ μ_{min1}, μ_{min2}, และ μ_1 คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ, P_c , C_r , C_s และสัญลักษณ์ α และ β เป็นพารามิเตอร์ต่างๆ โดยค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5.1

โดย
$$\mu_{const} = \mu_L \left(\frac{T}{300K}\right)^{-\zeta} \quad (3.2)$$

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ในโมเดลที่เกี่ยวข้องกับสภาพคล่องพาหะ

Symbol	Electrons	Holes	Unit
μ_L	1417	470.5	cm^2/Vs
ζ	2.5	2.2	1
μ_{min1}	52.2	44.9	cm^2/Vs
μ_{min2}	52.2	0	cm^2/Vs
μ_1	43.4	29.0	cm^2/Vs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) พารามิเตอร์ในโมเดลที่เกี่ยวข้องกับสภาพคล่องพาหะ

Symbol	Electrons	Holes	Unit
P_c	0	9.23×10^{16}	cm^{-3}
C_r	9.68×10^{16}	2.23×10^{17}	cm^{-3}
C_s	3.34×10^{20}	6.10×10^{20}	cm^{-3}
α	0.68	0.719	1
β	2.0	2.0	1

```
Physics {
   Recombination (
     Auger
      SRH(DopingDep)
   )
}
```

เป็นการจำลองปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์เกี่ยวกับการรวมตัวใหม่แบบออเจอร์ (Auger Recombination)

การสร้างแบบจำลองของแมกนีโตทรานซิสเตอร์โดยวิเคราะห์ผลกระทบของสนามแม่เหล็ก ซึ่งสมการพาหะของอิเล็กตรอนและโฮลได้ถูกตั้งขึ้นมาเพื่อหาคำตอบ โดยจำลองความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนและโฮล J_n และ J_p กระแสดริฟท์ (drift) และกระแสการแพร่ (diffusion) ของพาหะได้ถูกนำมาใช้ร่วมกับการเพิ่มขึ้นของสนามแม่เหล็กที่ไปเหนี่ยวนำกระแสเหล่านี้เข้าไปในตัวสมการ โดยผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่ไปเหนี่ยวนำกับกระแสที่ไหลในตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์นั้นเกิดจากแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) ซึ่งพิสูจน์โดยทฤษฎีของฮอลล์ (Hall Effect) ดังนั้นสมการความหนาแน่นของกระแส J (ใช้ได้ทั้งในกรณีที่พาหะเป็นอิเล็กตรอนหรือโฮล) แสดงดังสมการที่ 3.1

$$\vec{j} = \mu\vec{g} + \mu\frac{1}{1+(\mu^{*}B)^{2}}[\mu^{*}\vec{B}\times\vec{g} + \mu^{*}\vec{B}(\mu^{*}\vec{B}\times\vec{g})] \qquad (3.3)$$

เมื่อ μ คือค่าสภาพคล่องของพาหะ (Mobility), $\vec{g}$ คือค่าเวกเตอร์กระแสที่ไม่ขึ้นกับค่าสภาพคล่องของพาหะ, B และ $\vec{B}$ คือขนาดและเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก, μ^{*} คือค่า Hall Mobility ซึ่งมีค่าเท่ากับ $r\cdot\mu$ โดยที่ r คือค่า Hall Scattering factor ซึ่งมีค่าอิเล็กตรอนและโฮลในซิลิคอนเท่ากับ 1.1 และ 0.7 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการเห็นว่าผลของสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อกระแสขึ้นอยู่กับค่า Hall Mobility, ขนาดของสนามแม่เหล็กและทิศทางของสนามแม่เหล็กเมื่อเทียบกับทิศทางของกระแส ส่วน $\vec{B}\times\vec{g}$ แสดงถึงทิศทางของแรงลอเรนซ์ ที่ทำให้กระแสอิเล็กตรอนและโฮลเกิดการเบี่ยงเบนในตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ โดยใช้คำสั่ง MagneticField = (0.0, 0.0, 0.0) ในการจำลองปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ [24] ซึ่งเลขภายในวงเล็บคือความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่แกน X, Y, Z ตามลำดับ

```
Physics (MaterialInterface="Oxide/Silicon") {
   Recombination(surfaceSRH)
}
```

เป็นการจำลองปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์เกี่ยวกับการรวมตัวบนพื้นผิวของพาหะที่ความแตกต่างกันระหว่างวัสดุ 2 ชนิดของ Schockley-read-hall (SRH)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนและเทคโนโลยีการผลิตที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน การสร้างอาศัยเทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประกอบด้วย กระบวนการออกซิเดชัน, กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี, กระบวนการแพร่สารเจือ, การยิงฝังประจุและกระบวนการเมตัลไลเซชัน โดยทำกระบวนการเหล่านี้ซ้ำไปซ้ำมาจนกระทั่งได้อุปกรณ์ขึ้นมา ซึ่งการกำหนดกระบวนการสร้างในแต่ละขั้นตอนจะขึ้นกับกระจกต้นแบบที่ทำการออกแบบไว้ สำหรับรายละเอียดกระบวนการสร้างสร้างอุปกรณ์จะได้กล่าวถึงในหัวข้อของกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนต่อไป

4.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation process)

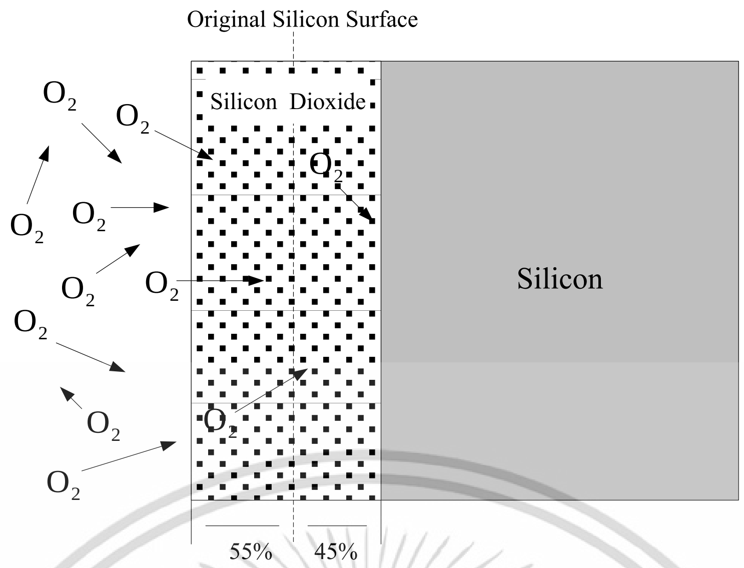
กระบวนการออกซิเดชันเป็นกระบวนการทางความร้อน (Thermal process) ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการสร้างอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ โดยเป็นกระบวนการของการสร้างชั้นออกไซด์ที่ผิวของแผ่นเวเฟอร์ จากการทำปฏิกิริยากันระหว่างก๊าซออกซิเจน (O_2) ซึ่งอาจเป็นออกซิเจนบริสุทธิ์หรือออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำ (H_2O)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

$$\mathrm{Si(solid) + O_2\,(gas) \rightarrow SiO_2\,(solid)} \tag{4.1}$$

$$\mathrm{Si(solid) + 2H_2O(vapor) \rightarrow SiO_2\,(solid) + 2H_2\,(gas)} \tag{4.2}$$

เริ่มต้นออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนที่ผิวเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งจะปกคลุมอยู่ที่ผิวของแผ่นเวเฟอร์ (Wafer) อย่างหนาแน่น โดยชั้นออกไซด์ที่ผิวจะทำหน้าที่ในการป้องกันไม่ให้โมเลกุลของออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนส่วนที่อยู่ลึกลงไปได้ อย่างไรก็ตาม อาจมีออกซิเจนบางส่วนที่สามารถแพร่ข้ามชั้นออกไซด์ที่ผิวเข้าไปทำปฏิกิริยากับซิลิคอนได้ ดังรูปที่ 4.1 ชั้นออกไซด์จะมีความหนาเพิ่มขึ้นและทำหน้าที่ป้องกันหรือลดการแพร่ของออกซิเจนให้ลดลง โดยชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนที่ขยายออกจากผิวหน้าเดิมของแผ่นเวเฟอร์ซึ่งมีความหนาประมาณ 55% และส่วนที่เกิดลึกลงไปในเนื้อซิลิคอน ซึ่งมีความหนาประมาณ 45% จากผิวเดิมของแผ่นเวเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 กระบวนการเกิดชั้นออกไซด์บนผิวของแผ่นซิลิคอน

กลไกของการเกิดออกไซด์ที่ผิวของแผ่นซิลิคอน เกิดเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีกันระหว่างโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนกับซิลิคอนดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยกระบวนการในการสร้างชั้นออกไซด์นี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ

4.1.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

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

4.1.2 การออกซิเดชันแบบเปียก (Wet Oxidation)

กระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก เป็นการทำปฏิกิริยากันทางเคมีระหว่างออกซิเจนกับซิลิคอน เพื่อให้เกิดเป็นออกไซด์เช่นเดียวกันกับกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง แต่แตกต่างกันตรงที่การออกซิเดชันแบบเปียก ออกซิเจนที่เกิดขึ้นมาจากโมเลกุลของน้ำ ดังแสดงในสมการที่ 4.2 คือที่อุณหภูมิสูงๆ โมเลกุลของน้ำสามารถแตกตัวเกิดเป็นก๊าซไฮโดรคลอไรด์ (HO) ซึ่งสามารถที่จะแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ได้เร็วกว่าโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน ดังนั้นกระบวนออกซิเดชันแบบเปียกจึงสามารถที่จะสร้างชั้นออกไซด์ได้รวดเร็วกว่ากระบวนการออกซิเจนแบบแห้ง การออกซิเดชันแบบเปียกถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านต่างๆ เช่น การสร้างมาส์คออกไซด์, การสร้างชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

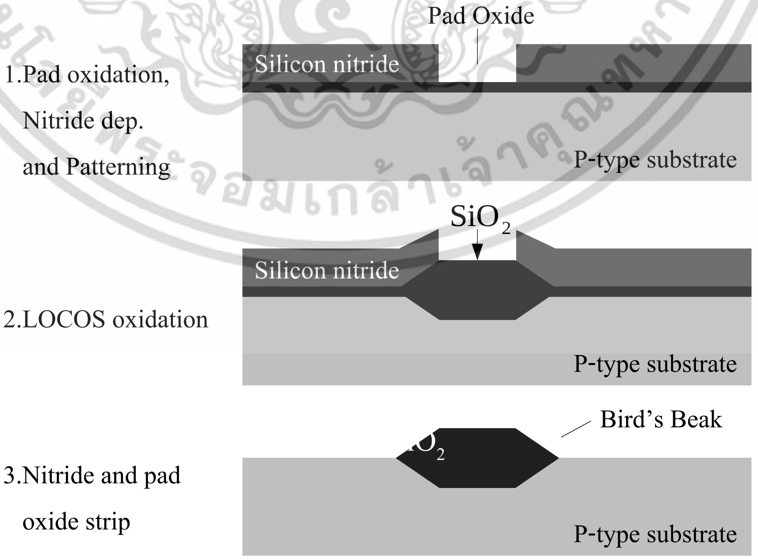
LOCOS ออกไซด์ เป็นต้น ตารางที่ 4.1 แสดงการเกิดชั้นออกไซด์ขนาดความหนา 1000 อังสตรอม ที่เวลาแตกต่างกันของกระบวนการออกซิเดชันทั้งสองชนิด

ตารางที่ 4.1 กระบวนการออกซิเดชันที่แตกต่างกัน

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

4.1.3 การสร้างชั้นออกไซด์หนา (LOCOS Oxidation)

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



รูปที่ 4.2 การสร้างชั้นออกไซด์เฉพาะที่จากกระบวนการออกซิเดชัน

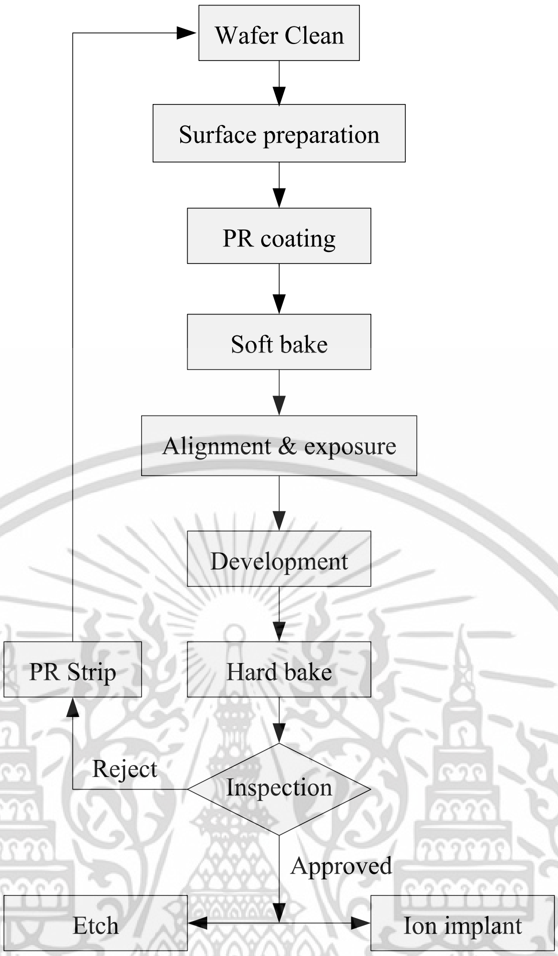
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี (Photolithography Process)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีเป็นกระบวนของการถ่ายแบบ (Patterning) จากกระจกต้นแบบไปยังน้ำยาไวแสงที่เคลือบอยู่บนผิวของแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งเมื่อฉายแสงลงบนผิวของแผ่นเวเฟอร์จะทำให้เกิดลวดลายต่างๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับกระบวน การโฟโตลิโธกราฟฟีเริ่มแรกถูกใช้ในอุตสาหกรรมทางด้านการผลิตแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ต่อมาถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตทรานซิสเตอร์และแผ่นวงจรรวม (Integrated circuit) สำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีถือเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญอย่างมากต่ออุตสาหกรรมการผลิต IC โดยจะทำหน้าที่ในการสร้างลวดลายต่างๆ ลงบนแผ่นเวเฟอร์ ก่อนทำการกัด (etching), การยิงฝังประจุ (ion implantation) หรือการแพร่สารเจือ (Diffusion) เพื่อทำเป็นขั้วต่างๆ ต่อไป

โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้ เริ่มต้นจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์อยู่ที่ผิวด้านบน ไปเคลือบผิวหน้าด้านด้วยน้ำยาไวแสง จากนั้นนำไปฉายแสงโดยผ่านกระจกต้นแบบ ที่เรียกว่าโฟโตมาส์ค (photo mask) ซึ่งทำหน้าที่เป็นต้นแบบ มีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจก ซึ่งได้มาจากการออกแบบ (design) แสงที่ฉายผ่านกระจกโฟโตมาส์ค จะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสง จึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณที่ไม่ถูกแสง ปฏิกิริยาเคมี-แสงที่เกิดขึ้น จะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่นผลึกนี้ไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป บางส่วนจะคงเหลือค้าง อยู่บนผิวของซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยาไวแสง ชั้นของน้ำยาไวแสงที่เหลือปกคลุมอยู่บนผิวซิลิคอนไดออกไซด์ จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณนี้ ถูกสกัด หรือเอตซิ่งค์ ด้วย “สารตัวสกัด” หรือเอตแชนท์ (etchant) เช่น กรดกัดแก้ว (HF) เป็นต้น ซึ่งในขั้นตอนของการเอตซิ่งค์ แผ่นผลึกจะถูกนำไปทำปฏิกิริยาเคมีกับสารเคมีที่เป็นสารตัวสกัด หรือ เอตแชนท์ ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะสามารถสกัดหรือละลายชั้นของออกไซด์ออกไปได้ ในที่สุด หลังจากนั้น เมื่อชั้นของน้ำยาไวแสงถูกลอกออก ก็จะปรากฏภาพ หรือลวดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้น โดยมีลักษณะเป็นลวดลายเหมือนกับลวดลายบนกระจกโฟโตมาส์ค การเกิดภาพลวดลายได้ ก็เพราะชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนถูกสกัดออกไป นั่นเอง ในรูปที่ 4.3 เป็นไดอะแกรมแสดงกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

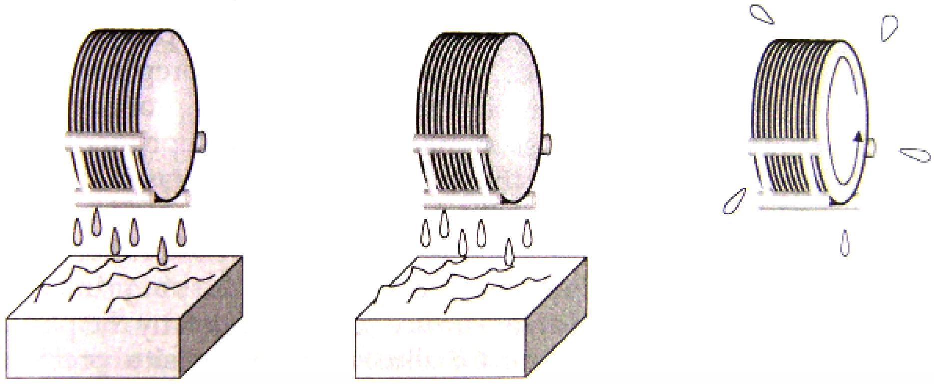


รูปที่ 4.3 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี

4.2.1 การทำความสะอาดผิวหน้า (Wafer clean)

ก่อนที่จะเริ่มต้นกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี และกระบวนการผลิตอื่นๆ จำเป็นที่จะต้องมีการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์เสียก่อน เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมต่างๆ เช่น คราบไขมันที่ติดมาหรือคราบฝุ่นละอองต่างๆ โดยทั่วไปแล้วจะใช้กระบวนการทางเคมีในการกำจัดสิ่งแปลก ปลอมเหล่านี้ออกไป ซึ่งหลังจากที่ทำความสะอาดด้วยสารเคมีแล้ว ต่อจากนั้นจะนำไปล้างด้วยน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงที่เรียกว่าน้ำ ดีไอ (DI, deionized) เพื่อทำการล้างสารเคมีที่ใช้ทำความสะอาดผิวหน้าออกไป และขั้นตอนสุดท้ายนำไปสปินให้แห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.4

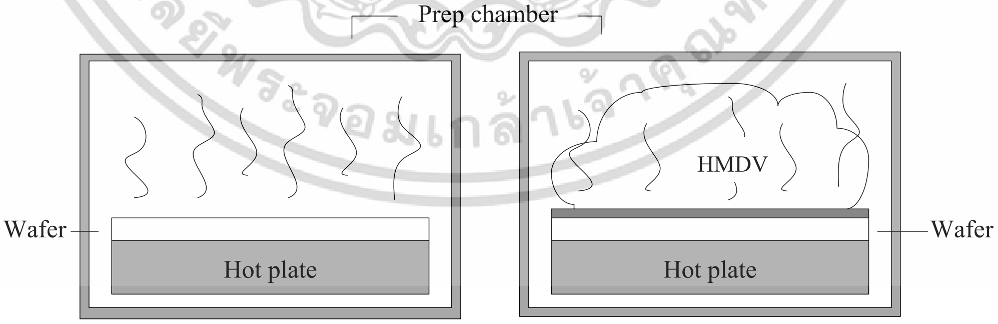
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ขั้นตอนกระบวนการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์

4.2.2 การเตรียมผิวหน้า (Surface preparation)

โดยปกติแล้วน้ำยาไวแสงจะถูกนำมาใช้งาน หรือถูกเคลือบบนผิวของวัสดุชนิดต่างๆ หลายชนิด แล้วแต่งานที่ต้องการทำ เช่น ชั้นออกไซด์ ชั้นซิลิคอน ชั้นอะลูมิเนียม เป็นต้น ดังนั้นการเตรียมผิวหน้าของแผ่นผลึกก่อนที่จะทำการเคลือบน้ำยาไวแสงบนผิวสารต่างชนิดกัน จะมีวิธีการเตรียมผิวที่ต่างกัน โดยผิววัสดุที่ใช้กันมากที่สุดก็คือ ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งการเตรียมผิวหน้าของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทำได้โดยเริ่มจากการกำจัดความชื้น หรือโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในชั้นออกไซด์ออกไป เพราะผิวของชั้นออกไซด์มีความสามารถในการดูดซึมไอน้ำหรือความชื้นจากอากาศได้ดี การกำจัดความชื้นทำได้โดยการอบ ซึ่งเรียกว่า Pre bake หรือ dehydration bake ที่อุณหภูมิ ราว 200-250 $^{\circ}$C นาน 30 นาที ภายหลังการอบ ถ้าหากนำออกมาทิ้งไว้นานเกินกว่า 1 ชั่วโมง ชั้นของออกไซด์จะดูดซึมความชื้นเข้าไปอีก จำเป็นต้องทำการอบใหม่ ดังนั้นเมื่ออบเสร็จแล้วควรดำเนินการเคลือบ



รูปที่ 4.5 กระบวนการเตรียมผิวหน้าก่อนเคลือบน้ำยาไวแสง

น้ำยาไวแสงทันที นอกจากนี้ ก่อนทำการเคลือบน้ำยาไวแสง อาจใช้สารพิเศษที่เรียกว่า Hexamethyl-disilazane (HMDS, $(CH_3)_3SiNHSi(CH_3)_3$) ฉีดพ่น หรืออบไอระเหย เพื่อช่วยให้ผิวสามารถยึดติดกับน้ำยาไวแสงได้ดียิ่งขึ้น เพราะสารนี้จะช่วยกำจัดโมเลกุลของน้ำออกจากชั้นผิวของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

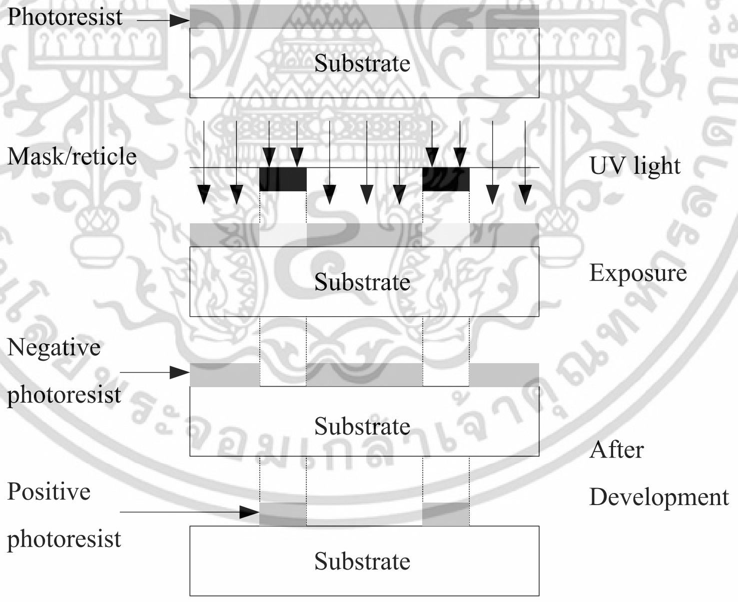
ออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยทั่วไปแล้วในเครื่องสปินเนอร์ จะมีหัวฉีดสเปรย์ของสาร HMDS แล้วปั่น หรือหมุนให้แห้ง จากนั้นจึงจะทำการเคลือบน้ำยาไวแสงต่อไป

4.2.3 การเคลือบน้ำยาไวแสง (Photoresist Coating)

การเคลือบน้ำยาไวแสงเป็นขั้นตอนการเคลือบชั้นฟิล์มบางของน้ำยาไวแสงที่ผิวด้านบนของแผ่นเวเฟอร์ โดยน้ำยาไวแสงจะมีด้วยกันสองแบบคือ แบบ Positive และแบบ Negative ซึ่งมีวิธีการใช้ที่แตกต่างกัน ในขณะที่กระบวนการเคลือบน้ำยาไวแสงก็จะมีด้วยกันหลายวิธี แล้วแต่ความเหมาะสมของการนำไปใช้งาน ซึ่งอาจสรุปได้ดังต่อไปนี้

4.2.3.1 น้ำยาไวแสง (Photoresist)

น้ำยาไวแสงเป็นสารโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติทางแสงคือ สามารถเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีได้เมื่อได้รับแสงตกกระทบ ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในด้านการสร้างลวดลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรือใช้ในอุตสาหกรรม IC สำหรับถ่ายแบบจากมาส์คที่ออกแบบไว้ไปยังแผ่นเวเฟอร์



รูปที่ 4.6 คุณสมบัติทางแสงที่แตกต่างกันของน้ำยาไวแสงสองชนิด

โดยน้ำยาไวแสงสามารรถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามคุณสมบัติในการตอบสนองต่อแสง คือ 1.Negative photoresist น้ำยาไวแสงชนิดนี้ หลังจากกระบวนการฉายแสงและการ develop แล้ว จะได้ลวยลายตรงกับข้ามกับต้นแบบ นั้นคือส่วนที่ไม่ถูกแสงจะถูกกัดออกเหลือไวเฉพาะบริเวณที่ถูกแสงเท่านั้น และ 2.Positive photoresist เป็นน้ำยาไวแสงที่หลังจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

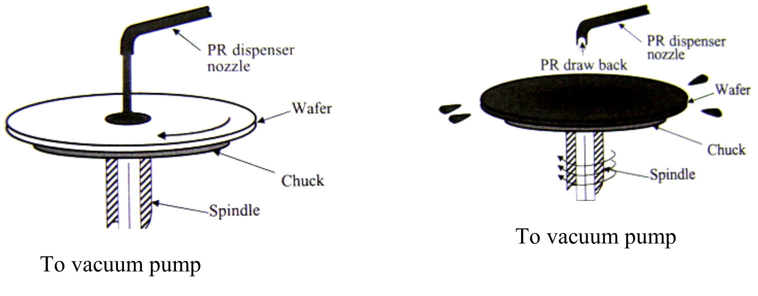
ฉายแสงและการ develop แล้ว จะได้ลวยลายแบบเดียวกับกับมาส์คหรือว่าต้นแบบ นั้นคือส่วนได้รับแสงจะถูกกัดออก ในขณะที่ส่วนที่ไม่ได้รับแสงจะคงเหลืออยู่ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งคุณสมบัติที่แตกต่างกันของน้ำยาไวแสงทั้งสองชนิด โดยอุตสหกรรมทางด้านเซมิคอนดักเตอร์ในปัจจุบันจะนิยมใช้น้ำยาไวแสงชนิด Positive เนื่องจากมีความละเอียดสูงกว่าชนิด Negative

4.2.3.2 วิธีการเคลือบ (Coating)

การเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกหรือแผ่นเวเฟอร์ ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หรือชั้นวัสดุอื่น ๆ อยู่ที่ผิวด้านบนนั้น สามารถกระทำได้หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสมหรือประเภทของงานที่ใช้ ซึ่งอาจสรุปได้ดังนี้

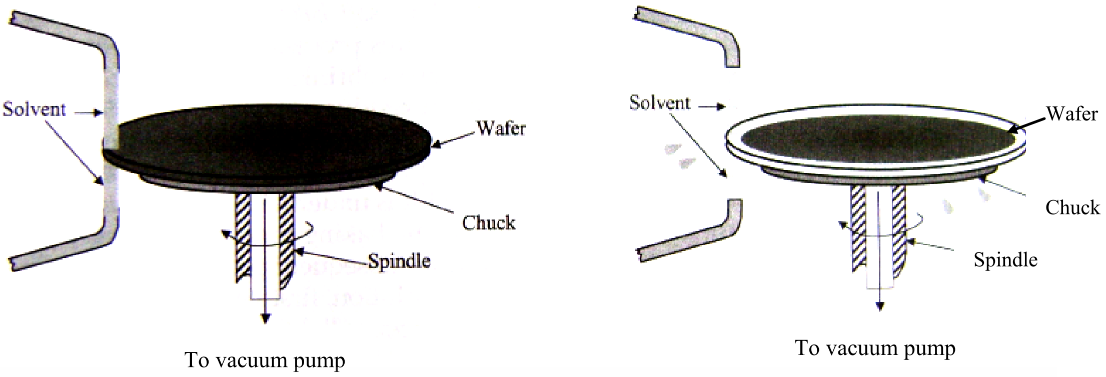
- แบบสปินเนอร์ (Spinner coating)

เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด สำหรับการเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกแบบวงกลม ซึ่งการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีนี้ จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวหมุน หรือสปินเดิล (Spindle) โดยมีแท่นหมุนที่สามารถปรับความเร็วได้ด้วยมอเตอร์ความเร็วรอบสูง แผ่นผลึกจะถูกวางลงบนแท่นหมุนและทำให้ยึดติดได้ด้วยระบบสุญญากาศ จากนั้นน้ำยาไวแสงจะถูกหยดลงบริเวณตรงกลางของแผ่นผลึก ด้วยปริมาณที่พอเหมาะ เมื่อแผ่นผลึกถูกหมุน (spin) ด้วยความเร็วรอบราว 3000-6000 rpm/min ใช้เวลาประมาณ 10-30 วินาที น้ำยาไวแสงจะถูกแรงเหวี่ยง ทำให้กระจายออกไปโดยรอบเกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนผิวของแผ่นผลึก ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยความหนาของฟิล์มบางไวแสงที่ได้มีค่าอยู่ที่ประมาณ 1000– 2000 อังสตรอม ถ้าหากความเร็วรอบต่ำเกินไป จะได้ชั้นของฟิล์มไวแสงที่หนามาก ในขณะที่ถ้าความเร็วรอบสูงๆ ความหนาของชั้นฟิล์มจะไม่เท่ากัน โดยบริเวณขอบของแผ่นผลึกจะหนามากกว่าส่วนอื่นๆ หลังจากที่เคลือบน้ำยาไวแสงที่ผิวของแผ่นผลึกเรียบร้อยแล้ว จำเป็นต้องมีการลอกฟิล์มที่บริเวณขอบแผ่นออก เพื่อไว้ใช้สำหรับในการจับหรือเคลื่อนย้ายแผ่นผลึก ดังในรูปที่ 4.8 โดยขั้นตอนกระบวนการต่างๆ เหล่านี้ต้องมีการระมัดระวังฝุ่นละอองเป็นพิเศษ ดังนั้นต้องทำภายในห้องสะอาดที่มีการควบคุมปริมาณของฝุ่นละออง หรือ Clean room ซึ่งฝุ่นละอองในอากาศในห้องนี้ จะถูกควบคุมให้มีขนาดเล็กและจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยใช้ระบบกรองฝุ่นประสิทธิภาพสูง (HEPA Filter)



รูปที่ 4.7 การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีการสปินเนอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 การลอกฟิล์มที่ขอบของแผ่นผลึกหลังจากการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยการสปินเนอร์

- แบบสเปรย์ (Spray coating)

วิธีการเคลือบน้ำยาไวแสงแบบสเปรย์ น้ำยาไวแสงจะถูกฉีด หรือพ่นออกมาให้เป็นละออง แล้วตกลงไปเกาะกับผิวหน้าของแผ่นผลึก และยึดเกี่ยวกันเป็นแผ่นฟิล์มบาง คล้ายกับการพ่นสีสเปรย์ซึ่งใช้ง่าย และสะดวกแต่เหมาะกับเฉพาะงานบางประเภท ซึ่งการควบคุมความหนาของฟิล์มที่ทำได้ยาก ปกติจะใช้ในบางขั้นตอนซึ่งไม่สำคัญ เช่น ใช้เคลือบสารไวแสงเพื่อป้องกัน ชั้นออกไซด์ด้านล่างของแผ่นผลึก

- แบบใช้ลูกกลิ้ง (Roller coating)

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

4.2.4 การอบ (Prebake or Soft bake)

ภายหลังการเคลือบน้ำยาไวแสงแล้ว จะต้องนำแผ่นผลึกไปอบเพื่อให้ชั้นของน้ำยาไวแสงแห้งสนิท ก่อนจะนำไปทำขั้นตอนต่อไป การอบในขั้นนี้ เรียกว่า Prebake หรือ Soft bake ซึ่งใช้อุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 90-100 $^{\circ}$C สำหรับน้ำยาไวแสงชนิดลบ และถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดบวกจะใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าเล็กน้อยคือที่ประมาณ 80-90 $^{\circ}$C สำหรับการอบที่ใช้เวลานานเกินไป หรือใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดความเสียหายกับชั้นน้ำยาไวแสงได้ เช่น เกิดมีปฏิกิริยาเคมี - ความร้อน หรืออาจทำให้ไหม้ได้ การอบมีหลายวิธีที่สามารถกระทำได้ เช่น ใช้เตาอบแบบพาความร้อน (Convection Oven) ซึ่งในตู้อบจะมีพัดลมช่วยพัดไอร้อนจากขดลวดความร้อน หรือฮีตเตอร์ (heater) ขึ้นมาผ่านแผ่นผลึกทำให้แผ่นผลึกร้อน การอบสามารถทำได้จำนวนหลายแผ่นพร้อมๆ กันโดยแผ่นผลึกจะถูกเก็บไว้ในกล่องคาสเซ็ทพิเศษ ซึ่งวิธีการให้ความร้อนด้วยวิธีนี้แผ่นผลึกจะได้รับความร้อนจากผิวรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

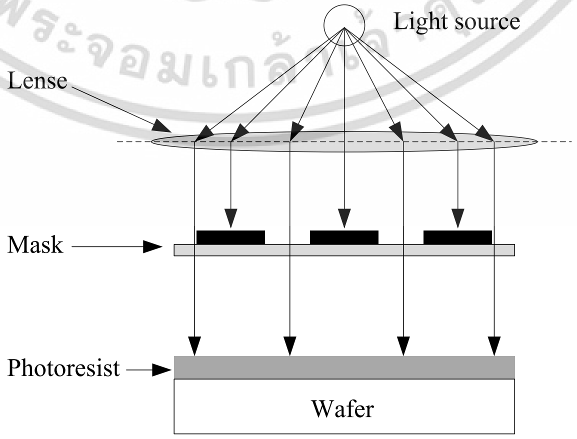
นอกเข้าไปด้านใน วิธีการนี้อาจทำให้ผิวหน้าของชั้นน้ำยาไวแสงได้รับความร้อนก่อน ที่อาจเป็นสาเหตุของการแข็งตัวและป้องกันไม่ให้ความชื้นที่อยู่ด้านในออกมาภายนอกได้ซึ่งถือเป็นข้อเสีย และไม่เหมาะที่จะนำไปใช้สำหรับงานที่มีความละเอียดสูง สำหรับในสายการผลิตวงจรรวมในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมอบแผ่นผลึกทีละแผ่น โดยเคลื่อนอยู่บนสายพาน ซึ่งถูกฉายด้วยรังสีอินฟาเรด วิธีการนี้ฐานรองที่เป็นแผ่นผลึกซิลิคอนจะได้รับความร้อนก่อนเพราะซิลิคอนมีคุณสมบัติดูดกลืนรังสีอินฟาเรดได้ดีกว่าชั้นของน้ำยาไวแสง ดังนั้นความร้อนจึงเริ่มจากฐานรองแผ่นผลึกซิลิคอน แล้วขึ้นไปสู่ชั้นน้ำยาไวแสง ซึ่งทำให้สามารถไล่ความชื้นออกมาได้โดยไม่เกิดปัญหา วิธีให้ความร้อนเช่นนี้เรียกว่า “Bottom up heating” นอกจากนี้อาจใช้วิธีการแบบแผ่นร้อน (Hot Plate) โดยนำแผ่นซิลิคอนไปวางบนแผ่นร้อน หรืออาจใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนก็สามารถทำได้เช่นกัน

4.2.5 การปรับมาส์คและการฉายแสง (Alignment and Exposure)

ขั้นตอนการปรับมาส์คและการฉายแสงเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี ซึ่งกระบวนการนี้จะทำหน้าที่ในการถ่ายแบบจากกระจกต้นแบบ ไปยังผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ตามที่ได้ออกแบบไว้

4.2.5.1 การปรับมาส์ค

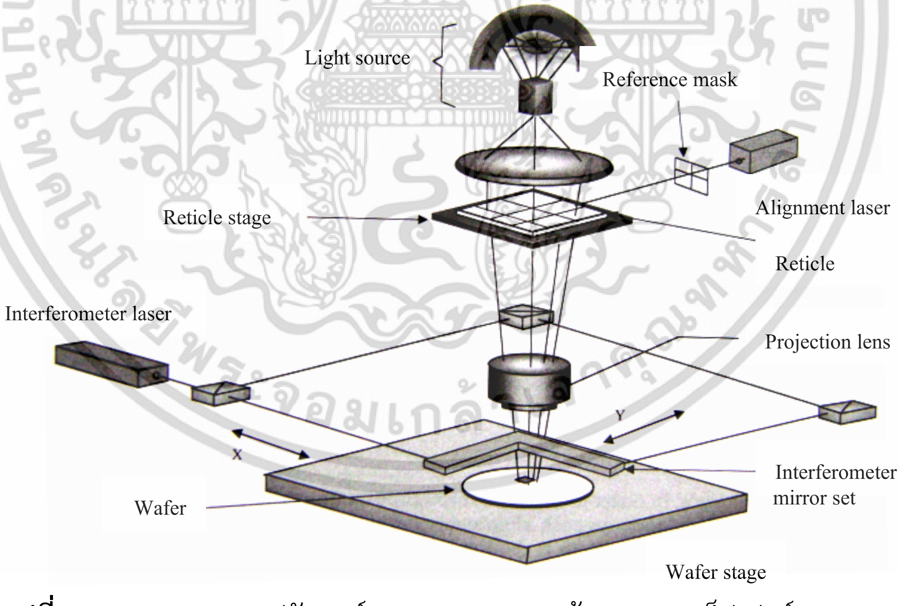
วิธีการฉายแสงผ่านกระจกโฟโตมาส์ค โดยปกติจะถูกวางสัมผัส(Contact) ลงไปบนแผ่นเวเฟอร์ที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่เป็นกระจกโฟโตมาส์คชิ้นแรก หรือมาส์คที่ 1 สามารถทำได้โดยไม่ต้องมีการปรับซ้อนมาส์ค (Mask alignment) ทั้งนี้เนื่องจาก ยังไม่ได้มีการสร้างส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจรรวม บนแผ่นเวเฟอร์เลย ดังในรูปที่ 4.9 แต่ในกรณีที่แผ่นเวฟอร์นั้น ได้ผ่านการสร้างส่วนของวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไป จำเป็นที่จะต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่ง หรือบริเวณที่ถูกต้อง เพื่อให้ได้โครงสร้างของวงจรรวมตามที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 4.9 กระบวนการถ่ายแบบจากมาส์คไปยังผิวของแผ่นเวเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการใช้กระจกโฟโตมาส์คตั้งแต่มาส์ค 2 เป็นต้นไป ก่อนการฉายแสงจำเป็นจะต้องมีการปรับตำแหน่งมาส์ค เพื่อให้แบบลวดลายบนกระจกมาส์ค ซ้อนกับแบบลวดลายที่มีอยู่บนแผ่น เวเฟอร์อย่างถูกต้องเสียก่อน เพื่อให้สามารถเปิดชั้นของออกไซด์ตรงตำแหน่งที่ถูกต้อง ทำให้ได้โครงสร้างของวงจรรวมเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ อย่างไรก็ดี เนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นในการปรับซ้อนจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วย ซึ่งเรียกว่า "ตัวปรับซ้อนมาส์ค" ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆ คือแผ่นเวเฟอร์จะถูกวางและติดไว้กับแท่นเลื่อน (X-Y-Z table) ซึ่งสามารถปรับให้เลื่อนในแนวนอน (X) แนวตั้งฉาก (Y) และแนวสูง (Z) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 การปรับเลื่อนนี้ทำได้ด้วยทั้ง แนว X, Y, Z นอกจากนี้ยังสามารถปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบ โดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ส่วนตำแหน่งของกระจกโฟโตมาส์คจะถูกยึดให้อยู่นิ่งเหนือแผ่นเวเฟอร์เล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ ทำให้สามารถสังเกตเห็นภาพลวดลายที่ปรากฏทั้งบนแผ่นเวเฟอร์และบนโฟโตมาส์ค พร้อมกับทำการปรับเลื่อนฐานที่ยึดแผ่นเวเฟอร์ไว้ทั้งแกน X, Y และมุม θ จนกระทั่งภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นเวเฟอร์และบนโฟโตมาส์คซ้อนกันตรงตำแหน่งที่ถูกต้อง จากนั้นทำการปรับให้ตำแหน่งของแผ่นเลื่อนสูงขึ้นในแนวแกน Z จนแนบสนิท กับกระจกโฟโตมาส์ค ในกรณีที่ภาพลวดลายมีขนาดใหญ่พอที่จะสังเกตได้ การปรับซ้อนภาพนี้จะสามารถทำได้โดยสังเกตจากลวดลายของวงจรรวมโดยตรง แต่โดยทั่วไปภาพลวดลายของวงจรรวมจะมีขนาดที่เล็กมาก



รูปที่ 4.10 กระบวนการปรับมาส์คและการฉายแสงด้วยระบบสเต็ปเปอร์ (Stepper)

เนื่องจากเป็นการยากที่จะทำการปรับซ้อนโดยสังเกตจากภาพลวดลายของวงจรรวม ดังนั้นในทางปฏิบัติเพื่อให้การปรับซ้อนทำได้ง่ายขึ้น จึงมีการใช้ภาพลวดลาย ซึ่งออกแบบขึ้นเพื่อใช้สำหรับการปรับซ้อนมาส์คโดยเฉพาะ และเรียกว่า "เครื่องหมายปรับซ้อน" ซึ่งอาจจะเป็นภาพจัตุรัสในกล่องสี่เหลี่ยม (square in box), กากบาทในสี่เหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมในกากบาท เช่น ภาพลวดลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บนแผ่นผลึกของ “เครื่องหมายปรับซ้อน” เป็นรูปจัตุรัส และภาพลวดลายบนกระจกมาส์ค เป็นรูปกล่องสี่เหลี่ยม เป็นต้น การปรับซ้อนทำได้โดยการปรับเลื่อนแผ่นผลึก บนแท่นให้อยู่ในตำแหน่งที่ได้ภาพ จัตุรัสเข้าไปซ้อนอยู่พอดี ภายในภาพกล่องสี่เหลี่ยม ในตำแหน่งนี้ภาพลวดลายของวงจรรวมบนแผ่นผลึก และบนกระจกโฟโตมาส์ค จะอยู่ตรงตำแหน่งที่ถูกต้องทุกประการ ถ้าหากการปรับซ้อนตำแหน่งผิดพลาด โครงสร้างของวงจรรวมก็จะไม่ถูกต้องและเกิดการเสียหายได้ ดังนั้นขั้นตอนของการปรับซ้อนจึงเป็นเรื่องสำคัญมาก

4.2.5.2 การฉายแสง (Exposure)

เมื่อทำการปรับซ้อนภาพระหว่างกระจกโฟโตมาส์ค และแผ่นเวเฟอร์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือ การฉายแสง ผ่านกระจกโฟโตมาส์ค เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ที่ชั้นของน้ำยาไวแสง โดยปกติน้ำยาไวแสงที่ใช้ในเทคนิคโฟโตลิโธกราฟิ สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวม จะมีความไวต่อแสงที่มีความยาวคลื่น λ ในช่วง 300-500 นาโนเมตร ซึ่งก็คือ แสงที่เรามองเห็นเป็นสีม่วง และสีน้ำเงินนั่นเอง ดังนั้นในห้องปฏิบัติการ เทคนิคโฟโตลิโธกราฟีจึงสามารถใช้แสงสีเหลืองได้ เพราะแสงสีเหลืองมีความยาวคลื่นมากกว่า 500 nm ซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสง แต่ถ้าเป็นฟิล์มถ่ายรูปจะต้องใช้แสงในห้องที่มีสีแดงเท่านั้น แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้มาจากหลอดไอปรอท (Mercury lamp) ซึ่งหลอดนี้จะให้เส้นสเปคตรัมที่มีความเข้มสูง ที่ความยาวคลื่นราว 365, 405 และ 436 นาโนเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยทั่วไปโครงสร้างที่มีลวดลายขนาดประมาณ 0.50 μm และ 0.35 μm จะใช้หลอดไอปรอทชนิด G – line และ I –line ที่ให้ความยาวเคลื่อนเท่ากับ 436 nm และ 365 nm ตามลำดับ สำหรับขนาดโครงสร้างอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขนาดสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง (Exposure Light Source) ชนิดต่างๆ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังสามารถนำคลื่นรังสีเอ็กซ์ (X - Ray) หรือลำอิเล็กตรอน (Electron beam) มาใช้แทนแสงได้ด้วย ทำให้สามารถพิมพ์ภาพลวดลายวงจรรวมที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ ซึ่งเทคนิคนี้ถูกเรียกว่า "เอ็กซเรย์ลิโธกราฟฟี" (X-Ray Photolithhography) และ Electron-beam Lithography ตามลำดับ อย่างไรก็ดีน้ำยาไวแสงที่จะใช้จะต้องแตกต่างจากธรรมดา เพราะรังสีเอ็กซ์และลำอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงกว่าแสงจากแบบทั่วไป

4.2.6 การล้างน้ำยาไวแสง (Development)

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

4.3 การกัด (Etching)

การกัดหรือการเอตชิ่ง (Etching) เป็นกระบวนการในการกำจัดสิ่งต่างๆ ออกจากผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ เช่น การกัดชั้นออกไซด์ที่ผิวของแผ่นเวเฟอร์, การกัดน้ำยาไวแสงในขั้นตอนของการล้างฟิล์มน้ำยาไวแสง เป็นต้น โดยกระบวนการกัดอาจจะกัดตามลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ หรืออาจจะกัดสารทั้งหมดที่เคลือบอยู่บนผิวของแผ่นเวเฟอร์ก็ได้ กระบวนการกัดสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามวิธีหรือเทคนิคของการกัด คือ การกัดแบบเปียก (Wet etch) และ การกัดแบบแห้ง (Dry etch) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

4.3.1 การกัดแบบเปียก (Wet Etch)

การกัดแบบเปียกเป็นวิธีการกัดสารที่เคลือบผิวออกจากแผ่นเวเฟอร์ด้วยสารละลายทางเคมี โดยกระบวนการนี้นิยมใช้กับโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่กว่า 3 μm ขึ้นไป ซึ่งอัตราการกัดจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ ตัวอย่างเช่น ในการกัดออกไซด์จะใช้กรดไฮโดรฟลูอริก (HF) ที่มีแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) ผสมอยู่เพื่อควบคุมปฏิกิริยาเคมีให้เกิดสม่ำเสมอ โดยกรดไฮโดรฟลูอริกจะทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่เป็น H_2SiF_6 กับน้ำ H_2Oสมการปฏิกิริยาแสดงได้ดังสมการที่ 4.3 สำหรับข้อดีของกระบวนการกัดแบบเปียกคือ อัตราการกัดที่สูง,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ราคาประหยัด แต่ข้อเสียคือไม่สามารถกัดโครงสร้างที่มีขนาดเล็กๆ ได้ และมีปัญหาเรื่องการกัดลึกเข้าไปใต้ชั้นป้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.11(ก)

$$SiO_2 + 6HF \rightarrow H_2SiF_6 + 2H_2O \tag{4.3}$$

4.3.2 การกัดแบบแห้ง (Dry Etch)

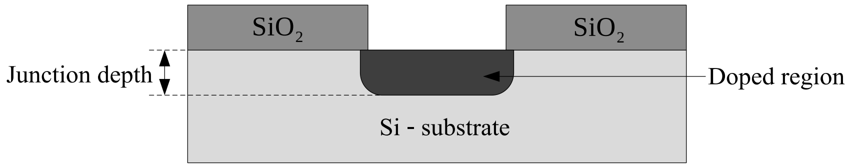
การกัดแบบแห้งหรือกระบวนการกัดโดยใช้พลาสมา (Plasma Etch) เป็นวิธีการกัดโดยการใช้ไอออนของแก๊ส (Ionized gas) หรือที่เรียกว่า “พลาสมา” เข้าไปทำลายพันธะเคมีของสารที่เคลือบอยู่ที่ผิวของแผ่นเวเฟอร์ โดยอนุภาคไอออนของพลาสมาอาจเข้าไปรวมตัวกับสารที่เคลือบอยู่เกิดเป็นสารใหม่แล้วหลุดออกไป การกัดแบบแห้งนี้สามารถกัดลวดลายได้คมชัดและเล็กกว่าการกัดแบบเปียกมาก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

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบผลจากการกัดด้วยกระบวนการสองแบบ (ก) การแบบเปียก (Wet etch) และ (ข) การกัดแบบแห้ง (Dry etch)

4.4 การแพร่สารเจือ (Diffusion)

เทคนิคของการเติมสารเจือด้วยวิธีการแพร่สาร (Diffusion) เป็นวิธีการเจือสารซึ่งถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับงานทางด้านอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวก ง่ายต่อการควบคุมใช้งาน สามารถทำได้ด้วยเตาความร้อนสูง (Furnace) ทั่วไป และสามารถแพร่สารเจือพร้อมกันได้คร่าวละมากๆที่สำคัญคือเป็นวิธีที่ประหยัด กระบวนการแพร่สารเจือสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามชนิดของการแพร่สารเจือคือ การแพร่สารเจือชนิดพี และ การแพร่สารเจือชนิดเอ็นโดยหลังจากที่ทำการแพร่สารเจือเรียบร้อยแล้วนั้น จะทำให้ได้สารเจือตรงบริเวณที่เป็นช่องเปิด ดังแสดงในรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการแพร่สารเจือ

4.4.1 การแพร่สารเจือชนิดพี

ธาตุที่สามารถนำมาใช้ในการแพร่สารเจือชนิดพี (p-type) ในงานสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซิลิคอน ได้แก่ แกลเลี่ยม (Gallium), อะลูมิเนียม (Aluminium), โบรอน (Boron) และอินเดียม (Indium) ซึ่งในทางปฏิบัติจริงๆ นั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกธาตุที่ใช้เป็นสารเจืออย่างพิถีพิถัน ไม่ใช่สามารถใช้ได้ทุกกรณี ตัวอย่างเช่น จะไม่ใช้ธาตุแกลเลี่ยมเป็นสารเจือชนิดพีเนื่องจากแกลเลี่ยมสามารถที่จะแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ได้ดี หรือก็คือ แกลเลี่ยมมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นออกไซด์ได้สูงนั่นเอง ทำให้การใช้ชั้นออกไซด์ป้องกันผิวของซิลิคอนใช้ไม่ได้ผล นอกจากนี้แล้วการเลือกใช้ธาตุใดเป็นสารเจือยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ ด้วย อย่างเช่น อะตอมของโบรอนจะทำให้เกิดโฮลได้ดีกว่าอะตอมของอินเดียม เนื่องจากระดับพลังงานผู้รับของโบรอนอยู่ที่ 0.01 eV ขณะที่ของอินเดียมอยู่ที่ระดับ 0.16 eV ส่วนอะลูมิเนียมมีข้อเสียคือ สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดี ทำให้กลายเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ง่าย จากเหตุผลต่างๆ ที่กล่าวมานี้ จึงทำให้โบรอนเป็นธาตุที่นิยมนำมาใช้เป็นสารเจือชนิดพีมากที่สุด โดยโบรอนมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่อยู่ที่ประมาณ 10^{-16} m^2/s ที่อุณหภูมิ 1150 $^{\circ}C$ ทำให้สามารถควบคุมการแพร่ได้สะดวก

เทคนิคการแพร่สารเจือโดยใช้โบรอนอาจสามารถทำได้ 3 แบบคือ อะตอมของโบรอนสามารถสังเคราะห์มาได้จากสารประกอบ 3 ชนิดในสถานะของแข็งคือโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) หรือในสถานะของเหลวคือ โบรอนไตรโบรไมต์ (BBr_3) และในสถานะของก๊าซคือ โบรอนไตรคลอไรด์ (BCl_3) ซึ่งไม่ว่าจะเป็นสารประกอบชนิดใดก็ตาม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวของซิลิคอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างโบรอนไตรออกไซด์และซิลิคอน ทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมโบรอนออกมาจาก B_2O_3 ที่ผิวของซิลิคอน โดยสามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้คือ

$$2B_2O_3 + 3Si \rightarrow 4B + SiO_3 \tag{4.4}$$

จากนั้นโบรอนจะแพร่เข้าไปในเนื้อของผลึกซิลิคอน แต่ในงานทางด้านอุตสาหกรรมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนิยมใช้สารประกอบ โบรอนไนไตรด์ (BN) เป็นต้นกำเนิดของโบรอน เนื่องจากมีความสะดวกในการแพร่มากที่สุด โดยที่สารประกอบโบรอนไนไตรด์ที่เป็นของแข็งจะทำให้อยู่ในลักษณะเป็นแผ่นบางๆ คล้ายแผ่นผลึกซิลิคอนก่อนทำการแพร่แผ่นโบรอนไนไตรด์จะถูกทำให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานได้ คือจะถูกนำไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 900 $^{\circ}C$ เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้บริเวณผิวของแผ่นโบรอนไนไตรด์กลายเป็นโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) เสียก่อนซึ่งเรียกว่าการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Activate จากนั้นจึงนำแผ่นผลึกซิลิคอนมาวางใกล้ๆ กับแผ่นโบรอนไนไตรด์นี้แล้วจึงทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว 1100 °C (ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน)

4.4.2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น

ธาตุที่สามารถนำมาใช้เป็นสารเจือชนิดเอ็น (n-type) ได้แก่ ฟอสฟอรัส (Phosphorus), พลวง(Antimony) และสารหนู (Arsenic) การจะเลือกธาตุที่จะนำไปเป็นสารเจือทำได้โดยไม่จำกัด ซึ่งต่างจากกรณี สารเจือชนิด p กล่าวคือ ธาตุเหล่านี้ใช้งานได้ดี ในแต่ละลำดับชั้น ตัวอย่างเช่น พลวง และสารหนู ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำมักใช้เป็นสารเจือชนิด n ในการแพร่เพื่อสร้างชั้นพัง (buried layer) n+ซึ่งเป็นการแพร่ครั้งแรกในงานสร้างวงจรรวม ส่วนการแพร่อื่นๆ โดยทั่วไปนิยมใช้ธาตุ ฟอสฟอรัสเป็นสารเจือชนิดเอ็น เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของฟอสฟอรัสสูงกว่าพลวงและสารหนู ดังนั้นจึงนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อความประหยัด คือสามารถแพร่ได้เร็วในช่วงเวลาอันสั้น การแพร่ฟอสฟอรัสสามารถกระทำให้ 3 ลักษณะเช่นเดียวกันคือ ฟอสฟอรัส อาจนำมาได้จากสารประกอบ 3 ชนิด เช่นในสถานะของแข็งได้แก่ ฟอสฟอรัสเพนต๊อกไซด์ (P_2O_5) หรือในสถานะของเหลวคือ ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ ($POCl_3$) หรือในสถานะก๊าซคือ ก๊าซฟอสฟีน (PH_3) ซึ่งเป็นก๊าซพิษ และอาจระเบิดได้ปฏิกิริยาซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวของซิลิคอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างฟอสฟอรัสเพนต๊อกไซด์ (P_2O_5) และซิลิคอน ทำให้เกิดการแยกตัวของฟอสฟอรัสออกจาก P_2O_5 ที่ผิวของซิลิคอน ซึ่งเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้

$$2P_2O_5 + 5Si \rightarrow 4P + 5SiO_3 \tag{4.5}$$

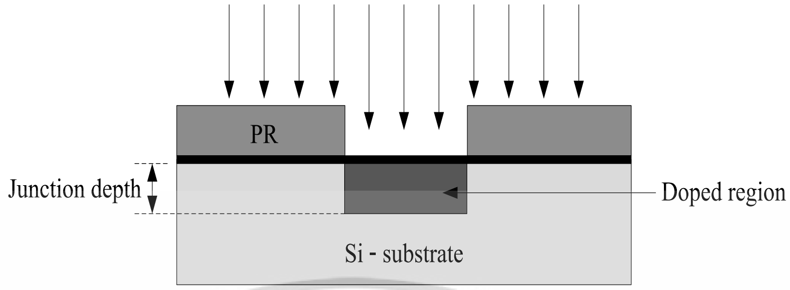
โดยธาตุฟอสฟอรัสจะแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอน ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้ $POCl_3$ เป็นต้นกำเนิดของสารเจือฟอสฟอรัสโดยทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว 1200 °C ในช่วงเวลาตามที่ต้องการในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน

4.5 การยิงฝังประจุ (Ion implantation)

การยิงฝังประจุเป็นอีกหนึ่งวิธีในกระบวนการเจือสารเจือสำหรับการผลิตอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในปัจจุบันถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวม (IC) อย่างแพร่หลาย โดยการเจือสารด้วยวิธีการยิงฝังประจุ ถือเป็นวิธีการเจือสารที่มีคุณภาพดีกว่าการเจือสารด้วยวิธีการแพร่ อย่างเช่น ความเข้มข้นของสารเจือ (concentration) และความลึกของรอยต่อ (Junction depth) จะไม่สามารถควบคุมขนาดได้ด้วยวิธีการแพร่ เนื่องจากความเข้มข้นและความลึกของรอยต่อจะสัมพันธ์กับค่าอุณภูมิกับเวลาที่ใช้ในการแพร่ ขณะที่การเจือสารด้วยวิธีการยิงฝังประจุสามารถที่จะควบคุมค่าทั้งสองอย่างได้อย่างอิสระ โดยความเข้มของสารเจือสามารถควบคุมได้ด้วยปริมาณความเข้มของกระแส Ion beam และเวลาที่ใช้ ส่วนค่าความลึกของรอยต่อสามารถควบคุมได้จากพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไอออน (Ion energy) สำหรับกระบวนการยิงฝังประจุสามารถเจือสารได้ความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 10^{11} ถึง 10^{17} อะตอม/ลบ.ซม. การเจือสารด้วยวิธีการยิงฝังประจุแสดงได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการยิงฝังประจุ

4.5.1 การยิงฝังประจุสารเจือชนิดพี (P-type)

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

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

4.5.2 การยิงฝังประจุสารเจือชนิดเอ็น (N-type)

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

สำหรับกระบวนการในการสารเจือทั้งสองวิธีที่ได้กล่าวมาคือ กระบวนการแพร่และการยิงฝังประจุ สามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติในด้านต่างๆ ได้ดังในตารางดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

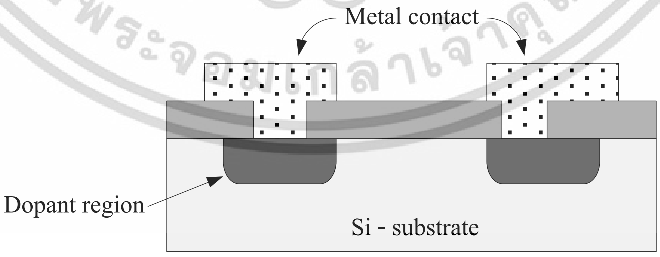
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติในด้านต่างๆ ระหว่างกระบวนการแพร่สารเจือกับการยิงฝังประจุ

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

4.6 การสร้างชั้นโลหะ (Metallization)

การสร้างชั้นโลหะหรือ การเมตัลไลเซชัน (Metallization) เป็นขั้นตอนของการสร้างชั้นของโลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่อขาอุปกรณ์เข้ากับขั้วไฟฟ้าภายนอกเข้า โดยโลหะที่ถูกนำมาใช้จะมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น อะลูมิเนียม (Aluminum), ไททาเนียม (Titanium) ทองแดง (Cupper), หรือโลหะผสมระหว่าง อะลูมิเนียมกับทองแดง (Al-Cu) เป็นต้น และอาจจะเลือกใช้โพลีซิลิคอน (Polysilicon) หรือสารประกอบของซิลิคอนกับธาตุอื่นอย่าง ไททาเนียมซิลิไซด์ (TiSi2) ที่มีความต้านไฟฟ้าน้อยกว่าโพลีซิลิคอน โดยการเลือกใช้โลหะสำหรับการทำเป็นขั้วโลหะนั้น แล้วแต่คุณสมบัติและความเหมาะสมต่องานที่นำไปใช้

สำหรับโลหะที่นิยนนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) ซึ่งเป็นโลหะที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีและมีราคาถูก จึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับทำเป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 4.14

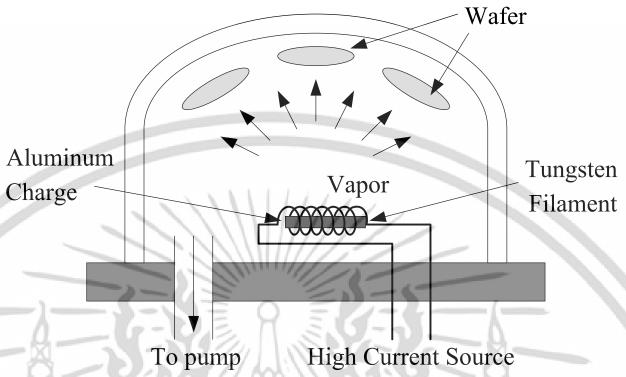


รูปที่ 4.14 การต่อชั้นโลหะสำหรับเชื่อมตัวขาอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก

กระบวนการเคลือบอะลูมิเนียมโดยทำให้อะลูมิเนียมกลายเป็นไอด้วยความร้อน และทำให้ไอระเหยไปเกาะอยู่บนผิวหน้าของแผ่นเรียกว่ากระบวนการระเหยในสุญญากาศ(evaporation) ซึ่งจะมีบทบาทสำคัญในกระบวนการเมตัลไลเซชันในการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ การเปลี่ยนอะลูมิเนียมให้กลายเป็นไอภายใต้ความดันต่ำโดยระบบต้องการความดันประมาณ 10^{-6} Torr เป็นการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ออกซิเจนและความชื้นเหลือน้อยที่สุด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะมีผลให้อะลูมิเนียมมีความต้านทานสูงได้ สำหรับกระบวนการระเหยในสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 4.15 โดยเส้นลวดถูกทำให้ร้อนจนละลายตลอดขณะที่ระบบอยู่ภายใต้ความดันต่ำ หลังจากนั้นอุณหภูมิคงที่อะลูมิเนียมจะระเหยแพร่ไปเคลือบบนแผ่นผลึก ทำให้มีชั้นอะลูมิเนียมบางๆเคลือบบนแผ่นผลึก การควบคุมความหนาของโลหะนั้นจะมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าซึ่งควบคุมโดยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยการเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15 กระบวนการระเหยในสุญญากาศ (Evaporation)

ของกระแสไฟฟ้าทำให้อัตราการเคลือบแผ่น (Deposition rate) สูงขึ้นตามไปด้วย แต่สิ่งสำคัญของระบบการผลิตนี้คือเป็นการยากในการควบคุมความหนาของฟิล์มซึ่งในกระบวนการสร้าง VLSI และ ULSI จะไม่ใช้กระบวนการนี้เนื่องจากกระบวนการระเหยในสุญญากาศนี้จะทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) มอสเฟตสูงขึ้นและทำให้วงจรรวมถูกลดความน่าเชื่อถือโดยระบบนี้จะใช้กระแสไฟฟ้าสูงมาก อยู่ที่ประมาณ 10 Amp ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ โดยโลหะที่ทำการสร้างบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะมีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์นั้นๆ ซึ่งคุณสมบัติของโลหะที่ดีควรจะมีคุณสมบัติดังนี้

- ค่าความต้านทาน (Contact resistance) มีค่าต่ำหรือเป็นคอนแทคที่ดีและมีสภาพเป็นโอห์มมิคคอนแทค (Ohmic contact)
- ความน่าเชื่อถือ (Reliability) เช่น ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารอื่นๆ ได้ง่าย คุณสมบัติจึงไม่เปลี่ยนแปลงนั่นคือโลหะมีอายุการใช้งานนาน
- ต้องสามารถทำการสกัด (Photo etching) ได้ และได้ลวดลายที่คมชัด และละเอียด
- ต้องยึดติดกับผิวของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)ได้ดีไม่ลอกง่าย รวมทั้งต่อเชื่อมกับลวดโลหะจากภายนอกได้ดี
- มีราคาถูก และสามารถสร้างได้โดยง่าย

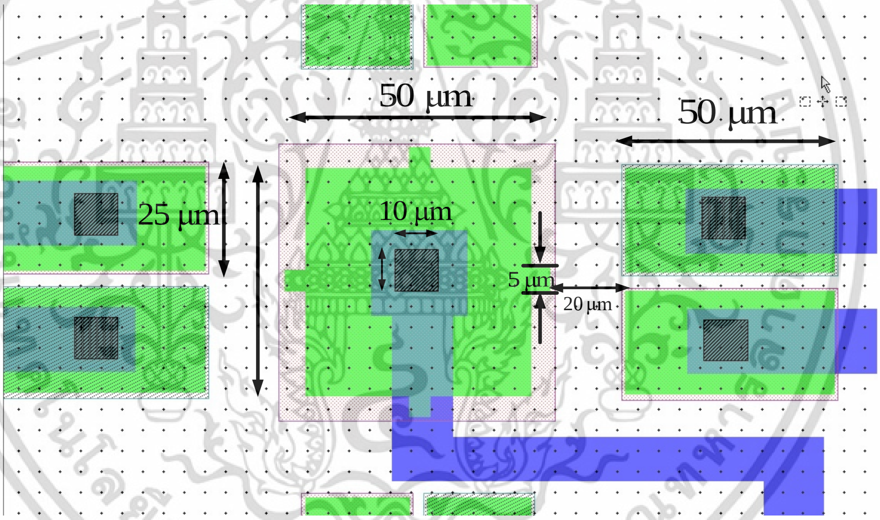
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

ในกระบวนการสร้างตัวอุปกรณ์ ต้องทำการออกแบบกระจกต้นแบบก่อนเพื่อใช้เป็นแบบสำหรับขั้นตอนการถ่ายแบบลงบนชิ้นงาน หลังจากนั้นเริ่มกระบวนการสร้างตัวอุปกรณ์โดยใช้กระบวนการที่กล่าวมาข้างต้น

4.7.1 การออกแบบกระจกต้นแบบ (Mask Design)

ในการออกแบบกระจกต้นแบบ ใช้โปรแกรม L-edit ในการออกแบบแสดงดังรูปที่ 4.16 ขั้วอิมิตเตอร์ 1 ขั้วมีความกว้างและความยาวเท่ากับ 50x50 ไมโครเมตร ถูกล้อมรอบด้วยชั้นออกไซด์หนา (LOCOS Oxide) ทั้งสี่ด้านของขั้วอิมิตเตอร์ถูกเปิดช่องความกว้างอิมิตเตอร์ (W_E) มีขนาด 5 ไมโครเมตร ขั้วเบสและขั้วคอลเลคเตอร์ถูกออกแบบให้มีขนาดเท่ากันและสมมาตรกัน มีความกว้างและความยาวเท่ากับ 25x50 ไมโครเมตร ระยะระหว่างขั้วอิมิตเตอร์และขั้วคอลเลคเตอร์-เบสมีความยาว (L) เท่ากับ 20 ไมโครเมตร ออกแบบช่องคอนแทคมีขนาด 10x10 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.16 การออกแบบอุปกรณ์ด้วยโปรแกรม L-edit

โดยกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน ใช้กระจกต้นแบบ 2 ชิ้น มีทั้งหมด 6 ชั้น ดังต่อไปนี้คือ

ชั้นที่ 1 แอคทีฟ (Layer 1:Active) แสดงดังรูปที่ 4.17(ก) ใช้กำหนดพื้นที่ของตัวอุปกรณ์ที่จะทำการสร้าง

ชั้นที่ 2 เอ็น ซีเล็ค (Layer 2:N-Select) แสดงดังรูปที่ 4.17(ข) ใช้สำหรับการสร้างเบสขึ้นจากกระบวนการยิงฝังประจุฟอสฟอรัส

ชั้นที่ 3 พี ซีเล็ค (Layer 3:P-Select) แสดงดังรูปที่ 4.17(ค) ใช้สำหรับการสร้างอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ด้วยกระบวนการยิงฝังประจุโบรอน

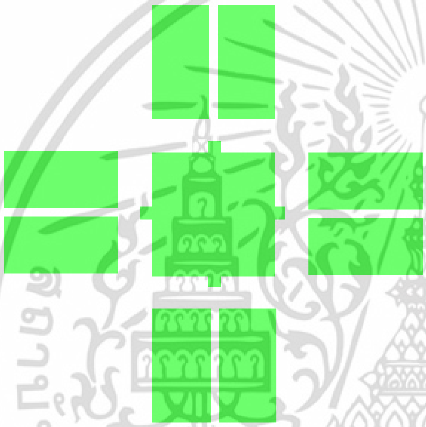
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นที่ 4 คอนแทค (Layer 4:Contact) แสดงดังรูปที่ 4.17(ง) ใช้ในการเปิดช่องเพื่อทำการเชื่อมต่อกับชั้นโลหะ

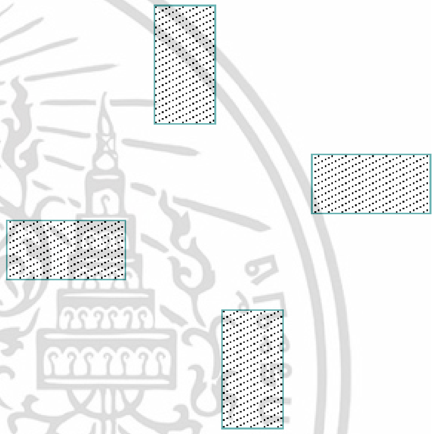
ชั้นที่ 5 เมทัล (Layer 5:Metal) แสดงดังรูปที่ 4.17(จ) ใช้สำหรับการสร้างชั้นโลหะ เช่น อะลูมิเนียม (Al), ไททาเนียม (Ti), ไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) เป็นต้น

ชั้นที่ 6 แพด (Layer 6:Pad) แสดงดังรูปที่ 4.17(ฉ) ใช้สำหรับสร้างพื้นที่ที่เป็นจุดเชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้าภายนอก

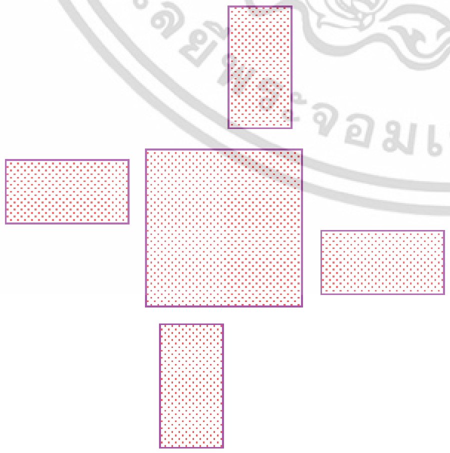
ในรูปที่ 4.18 แสดงโครงสร้างทั้งหมดของตัวแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนและในรูปที่ 4.19 แสดงกระจกต้นแบบที่ใช้



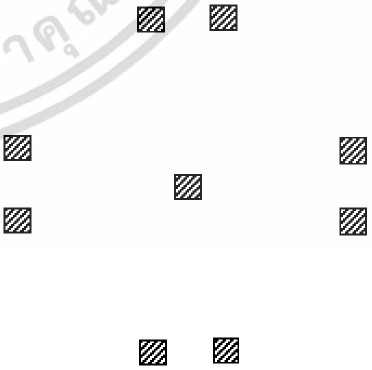
(ก) ชั้นที่ 1 แอคทีฟ (Active)



(ข) ชั้นที่ 2 เอ็น ซีเล็ค (N-Select)

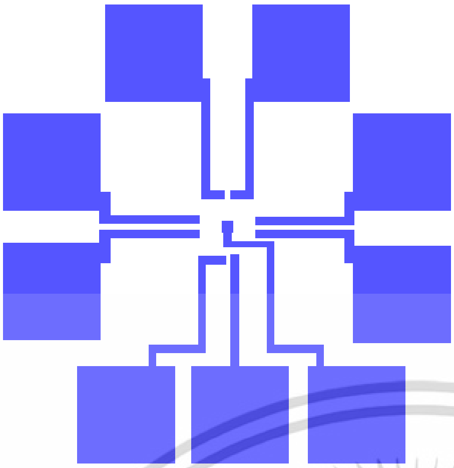


(ค) ชั้นที่ 3 พี ซีเล็ค (P-Select)

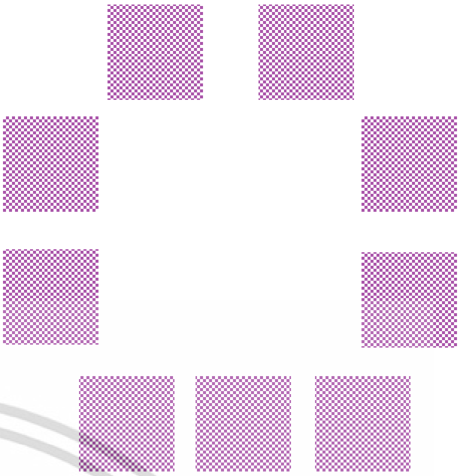


(ง) ชั้นที่ 4 คอนแทค (Contact)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

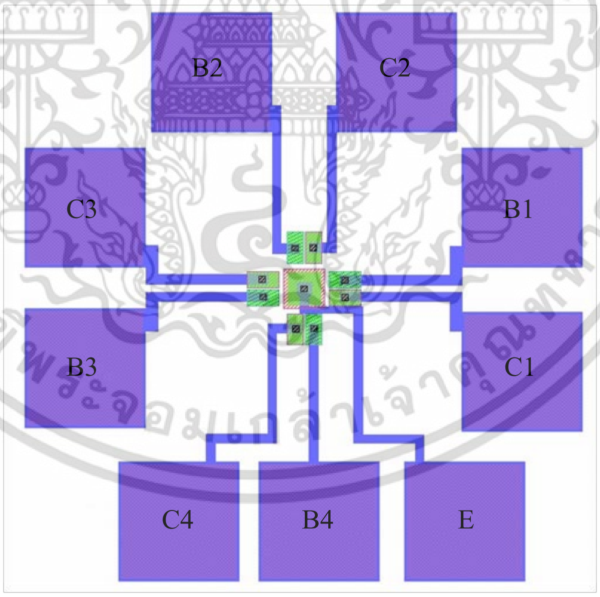


(จ) ชั้นที่ 5 เมทัล (Metal)



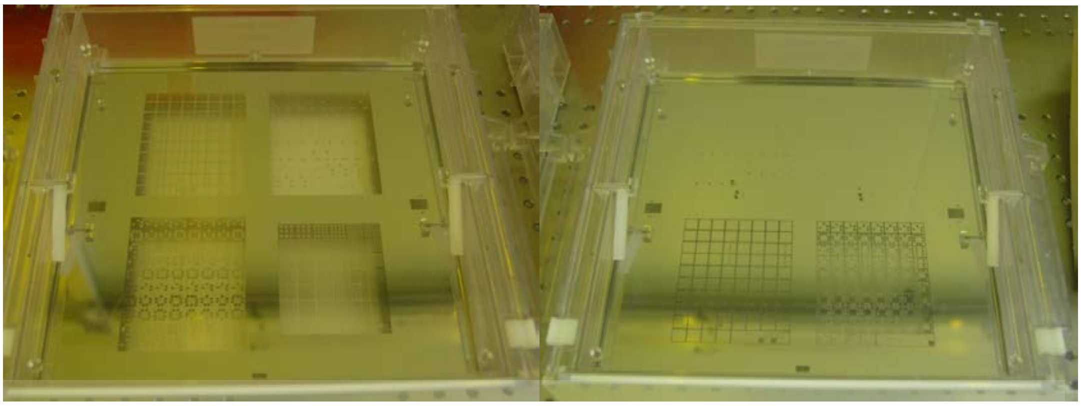
(ฉ) ชั้นที่ 6 แพด (Pad)

รูปที่ 4.17 (ก) - (ฉ) ชั้นทั้งหมดสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน



รูปที่ 4.18 โครงสร้างของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



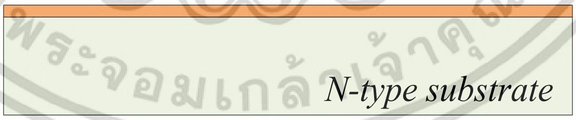
รูปที่ 4.19 กระจกต้นแบบ

4.7.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน ขั้นตอนการสร้างตัวอุปกรณ์สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- เริ่มต้นจากการนำแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ 100 หนา 650 ไมโครเมตร มีค่าความต้านทานแผ่น 20-30 Ω-cm มาทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดและกัดด้วยสารเคมีอัตโนมัติ (Automatic Wet Bench - AWB) โดยใช้ Pirunha+SC1+HF

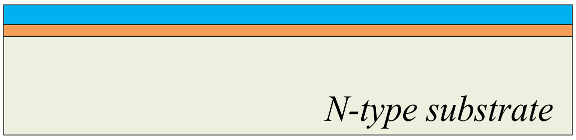
รูปที่ 4.20 แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น

- สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ SiO_2 ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้งด้วยเตาปลูกออกไซด์แบบแห้งที่อุณหภูมิ 900°C โดยมีความหนา 15 nm



รูปที่ 4.21 การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

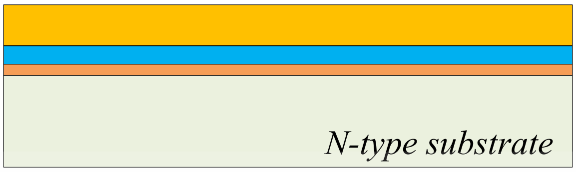
- สร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ด้วยเครื่องปลูกฟิล์มบางซิลิคอนไนไตรด์โดยมีความหนา 150 nm



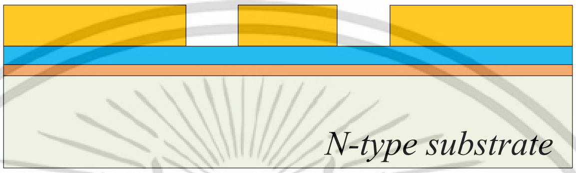
รูปที่ 4.22 การสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีชั้นที่ 1 โดยเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มไวแสง จากนั้นทำการถ่ายแบบกระจกต้นแบบด้วยเครื่องถ่ายย่อแบบลายวงจร และนำไป Develop ด้วยเครื่องล้างน้ำยาไวแสง



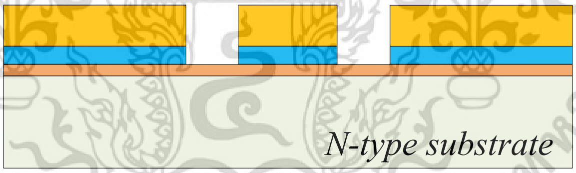
(ก)



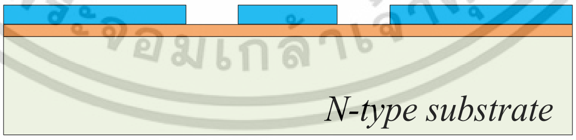
(ข)

รูปที่ 4.23 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีชั้นที่ 1 (ก) การเคลือบน้ำยาไวแสงและ (ข) การ develop

- กัดไนไตรด์ออกด้วยเครื่องกัดชั้นซิลิคอนออกไซด์ และทำการยิงฝังประจุลงไปใต้บริเวณที่จะทำการสร้างชั้น LOCOS เพื่อลดผลกระทบของปัญหารอยต่อแผง จากนั้นทำการล้างน้ำยาไวแสงออกให้หมด และทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ด้วย Pirunha+SC1



(ก)

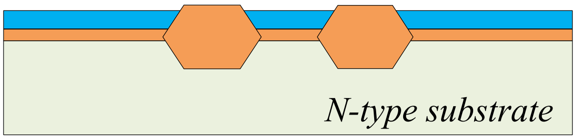


(ข)

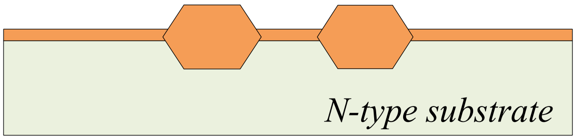
รูปที่ 4.24 (ก) การกัดไนไตรด์และ (ข) ล้างน้ำยาไวแสง

- สร้างชั้น LOCOS oxide ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบเปียกที่อุณหภูมิ 1000°C โดยมีความหนา 650 nm และทำการกัดชั้นไนไตรด์ออกด้วยสารเคมีฟอสฟอริค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



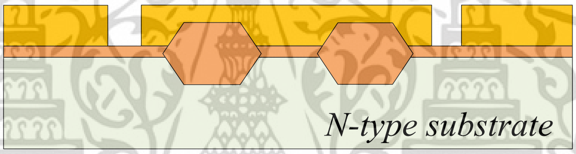
(ก)



(ข)

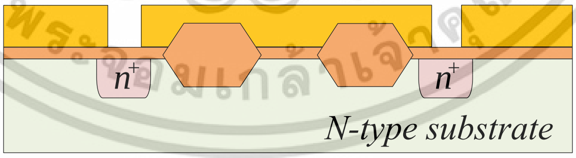
รูปที่ 4.25 (ก) การสร้างชั้น LOCOS oxide และ (ข) การกัดชั้นไนไตรด์

- ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีชั้นที่ 2 โดยเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มไวแสง จากนั้นทำการถ่ายแบบกระจกต้นแบบด้วยเครื่องถ่ายย่อแบบลายวงจร และนำไป Develop ด้วยเครื่องล้างน้ำยาไวแสง

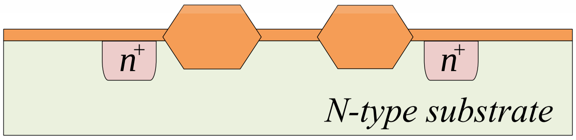


รูปที่ 4.26 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีชั้นที่ 2 หลังจากผ่านการ develop

- ยิงฝังประจุฟอสฟอรัสความเข้มข้นอะตอมสารเจือ 3e^{15} atom/cm^{3} พลังงาน 40 KeV ด้วยเครื่องยิงฝังประจุ เพื่อสร้างเบสที่ความลึกรอยต่อประมาณ 1 um จากนั้นลอกชั้นของฟิล์มไวแสงออกให้หมด



(ก)

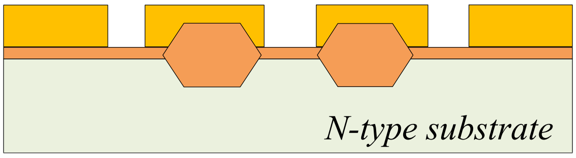


(ข)

รูปที่ 4.27 (ก) การยิงฝังประจุฟอสฟอรัสและ (ข) การล้างน้ำยาไวแสง

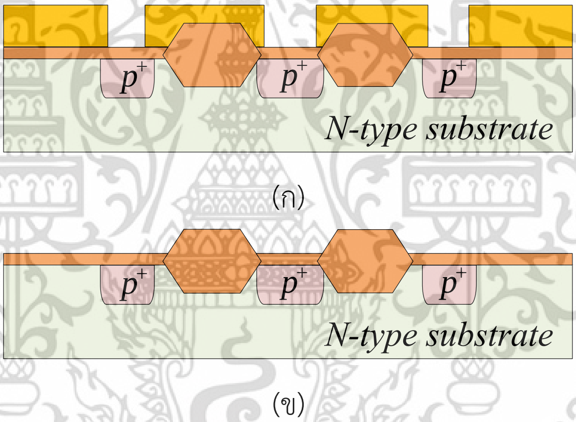
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีชั้นที่ 3 โดยเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มไวแสง จากนั้นทำการถ่ายแบบกระจกต้นแบบด้วยเครื่องถ่ายย่อแบบลายวงจร และนำไป Develop ด้วยเครื่องล้างน้ำยาไวแสง



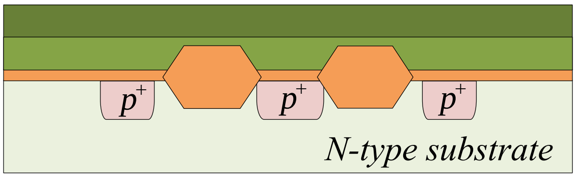
รูปที่ 4.28 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีชั้นที่ 3 หลังจากผ่านการ develop

- ทำการยิงฝังประจุโบรอนความเข้มข้นอะตอมสารเจือ 1e^{16} atom/cm^{3} พลังงงาน 40 KeV ด้วยเครื่องยิงฝังประจุ เพื่อสร้างอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ที่ความลึกรอยต่อประมาณ 1 um จากนั้นลอกชั้นฟิล์มไวแสงออกให้หมด
-



รูปที่ 4.29 (ก) การยิงฝังประจุโบรอนและ (ข) การล้างน้ำยาไวแสง

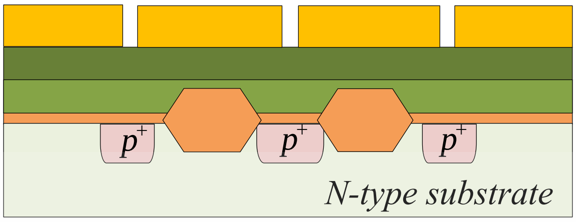
- ทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ด้วย Piranha+SC1 และทำการแอนนีลที่อุณหภูมิ $900^{\circ}C$ เป็นเวลา 30 นาที ด้วยเตาปลูกออกไซด์ด้วยไอน้ำ ต่อไปสร้างชั้น TEOS oxide ที่ความหนา 500 nm ด้วยเครื่องสร้างชั้นฟิล์มด้วยไอสารเคมีความดันต่ำ และสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยเครื่องปลูกฟิล์มไอสารเคมีแบบพลาสม่า โดยมีความหนา 500 nm จากนั้นทำกระบวนการ Densification ด้วยเตาแพร่สารเจือ ที่อุณหภูมิ $750^{\circ}C$ เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.30 การสร้างชั้น TEOS

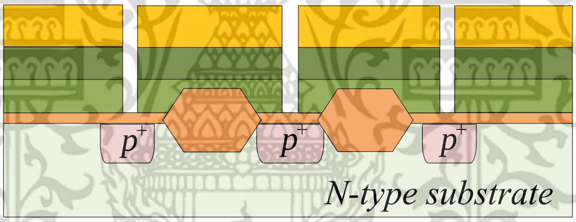
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีชั้นที่ 4 โดยเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มไวแสง จากนั้นทำการถ่ายแบบกระจกต้นแบบด้วยเครื่องถ่ายย่อแบบลายวงจร และนำไป Develop ด้วยเครื่องล้างน้ำยาไวแสง

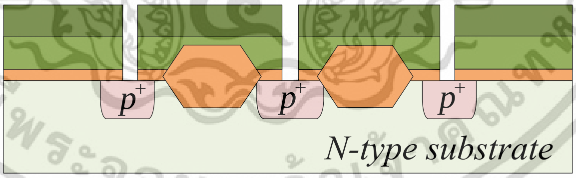


รูปที่ 4.31 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีชั้นที่ 4 หลังจากผ่านการ develop

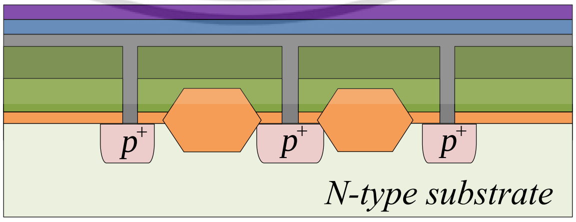
- กัดชั้นฟิล์ม TEOS และ PEOXIDE ออก จากนั้นลอกชั้นฟิล์มไวแสงออกให้หมด ต่อไปทำการกัดชั้นออกไซด์ออกด้วย HF 1% เป็นเวลา 60 วินาที จากนั้นสร้างชั้น Ti ที่ความหนา 30 nm และ TiN ที่ความหนา 80 nm , Al ที่ความหนา 700 nm และสุดท้ายสร้างชั้น TiN ที่ความหนา 80 nm โดยใช้เครื่องเคลือบฟิล์มโลหะด้วยเทคนิคสปัตเตอริ่ง



(ก)



(ข)

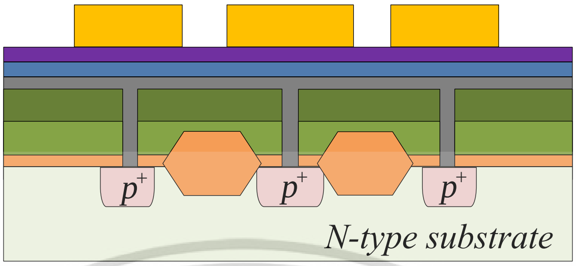


(ค)

รูปที่ 4.32 (ก) การกัดชั้นออกไซด์และ (ข) ล้างน้ำยาไวแสงจากนั้น (ค) สร้างชั้นโลหะ

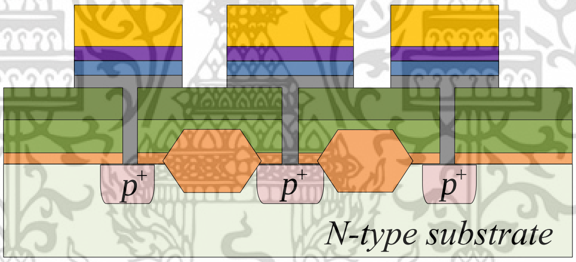
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีชั้นที่ 5 โดยเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มไวแสง จากนั้นทำการถ่ายแบบกระจกต้นแบบด้วยเครื่องถ่ายย่อแบบลายวงจร และนำไป Develop ด้วยเครื่องล้างน้ำยาไวแสง

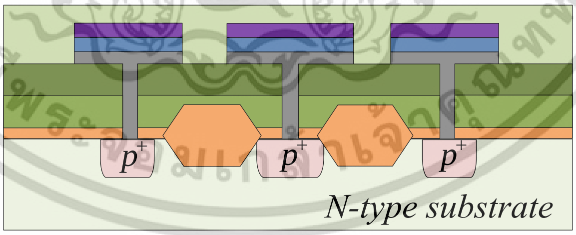


รูปที่ 4.33 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีชั้นที่ 5 หลังจากผ่านการ develop

- กัดชั้นโลหะส่วนที่ไม่ต้องการออกไปตามการออกแบบไว้ จากนั้นลอกชั้นน้ำยาไวแสงออกให้หมด และสร้างชั้นไนไตรด์ที่ความหนา 500 nm ด้วยเครื่องปลูกฟิล์มด้วยไอสารเคมีแบบพลาสม่า



(ก)

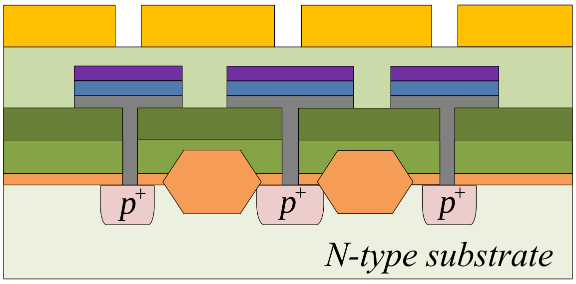


(ข)

รูปที่ 4.34 (ก) การกัดชั้นโลหะส่วนที่ไม่ต้องการและ (ข) การสร้างชั้นไนไตรด์

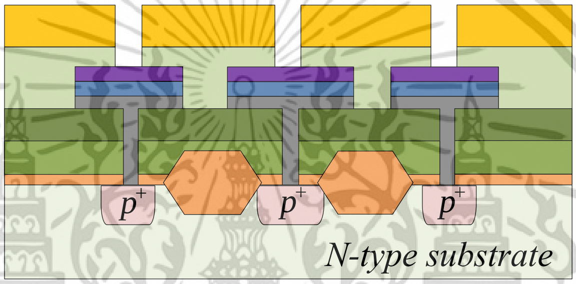
- ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีชั้นที่ 6 โดยเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มไวแสง จากนั้นทำการถ่ายแบบกระจกต้นแบบด้วยเครื่องถ่ายย่อแบบลายวงจร และนำไป Develop ด้วยเครื่องล้างน้ำยาไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

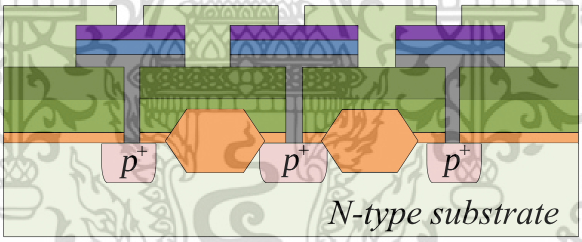


รูปที่ 4.35 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีชั้นที่ 6 หลังจากผ่านการ develop

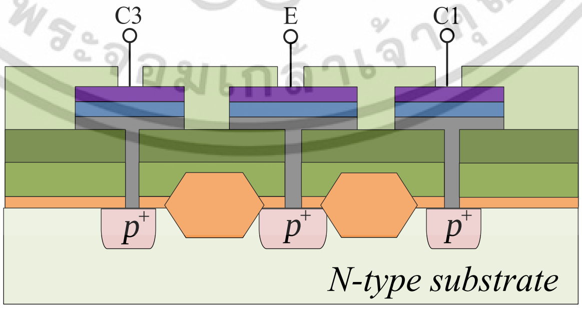
- กัดชั้นไนไตรด์ส่วนที่ไม่ต้องการ และลอกชั้นฟิล์มไวแสงออกให้หมด สุดท้ายทำกระบวนการ Sintering ด้วยเตาสร้างพันธะโลหะ โดยอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จแล้วแสดงดังรูป 4.36(ค)



(ก)



(ข)

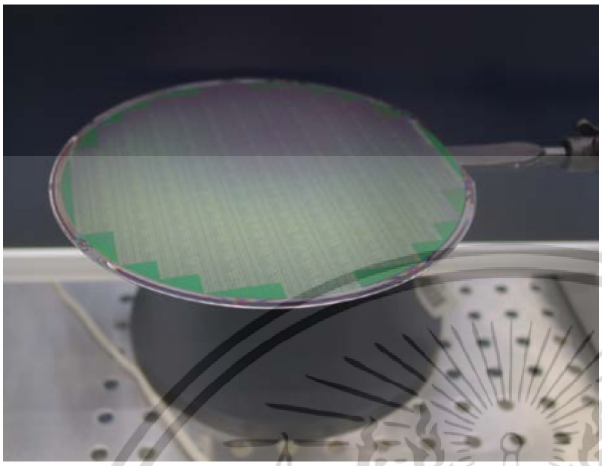


(ค)

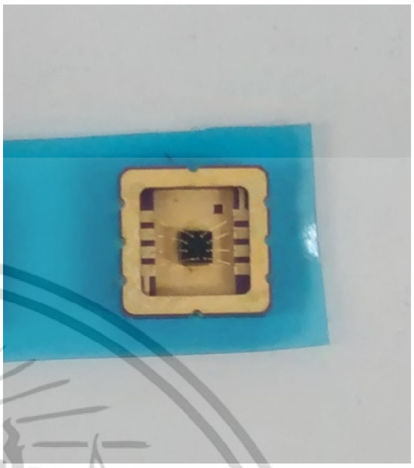
รูปที่ 4.36 (ก) การกัดชั้นไนไตรด์จากนั้น (ข) ล้างชั้นน้ำยาไวแสงและ (ค) อุปกรณ์ที่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.37(ก) แสดงแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนที่สร้างเสร็จเรียบร้อยภายในแผ่นซิลิคอน 1 แผ่นและรูปที่ 4.37(ข) แสดงภาพถ่ายของอุปกรณ์หลังจากผ่านขั้นตอนการบรรจุภัณฑ์เรียบร้อยแล้ว



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.37 (ก) แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนในแผ่นซิลิคอนที่สร้างเสร็จเรียบร้อยและ (ข) อุปกรณ์หลังจากผ่านการบรรจุภัณฑ์

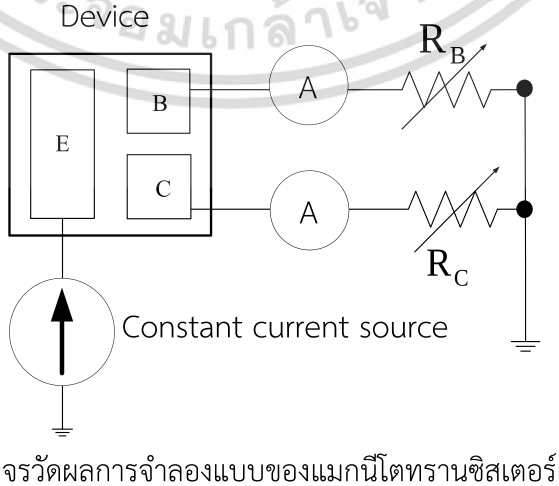
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน ซึ่งใช้โปรแกรม TCAD Sentaurus ในการจำลองแบบผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางต่างๆ (B_X, B_Y, B_Z) โดยหลังจากสร้างโครงสร้างและกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความกว้างอิมิตเตอร์ ความกว้างเบส ความเข้มข้นอะตอมสารเจือเรียบร้อยแล้ว จะทำการให้ค่าสนามแม่เหล็กทิศทางต่างๆ แก่อุปกรณ์เพื่อดูความแตกต่างของกระแส ค่ากระแสสามารถวัดได้ที่ขั้วเบสและขั้วคอลเลคเตอร์ ซึ่งกระแสที่ได้คือกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ตามลำดับ ทำการไบอัสอุปกรณ์ด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่จากนั้นทำการวัดกระแสเอาท์พุทระหว่างเบสและคอลเลคเตอร์เพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงในสภาวะปกติและสภาวะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทาง B_X, B_Y และ B_Z รวมทั้งแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนที่สร้างขึ้นจริงด้วย

5.1 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา

จากรูปที่ 5.1 แสดงวงจรการวัดผลการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา ขั้วอิมิตเตอร์จะถูกไบอัสไปข้างหน้า (forward bias) ด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ กระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์สามารถวัดได้ที่ขั้วเบสและขั้วคอลเลคเตอร์ตามลำดับ ตัวต้านทาน R_B จะต่อเข้ากับขั้วเบสและตัวต้านทาน R_C จะต่อเข้ากับขั้วคอลเลคเตอร์เพื่อปรับค่าออฟเซตระหว่างขั้วเบสและขั้วคอลเลคเตอร์ให้เป็นศูนย์ก่อนเริ่มใช้งาน



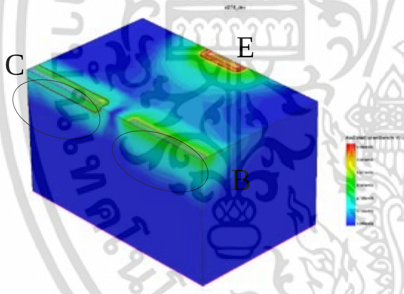
รูปที่ 5.1 วงจรวัดผลการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

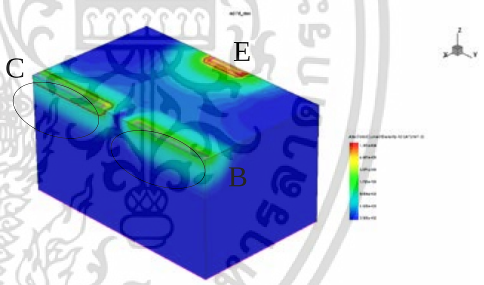
การทำงานเบื้องต้นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาอาศัยผลของการรวมตัวใหม่ (recombination)และการเบี่ยงเบนของพาหะ(carrier deflection) เนื่องมาจากแรงลอเรนซ์ ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กผ่านตัวอุปกรณ์และตั้งฉากกับทิศทางกระแสทำให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระเบสและกระแสคอลเลคเตอร์($\Delta I_{CB} \neq 0$)

ขณะไม่มีสนามแม่เหล็กและอิมิตเตอร์ถูกไบอัสด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ พาหะโฮลจะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปยังขั้วเบสและรวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสกลายเป็นกระแสเบส และจะมีพาหะโฮลส่วนหนึ่งเคลื่อนที่ไปยังขั้วคอลเลคเตอร์กลายเป็นกระแสคอลเลคเตอร์ กระแสอิมิตเตอร์คือผลรวมระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์

รูปที่ 5.2 แสดงผลการจำลองจากโปรแกรม TCAD Sentaurus ขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก โดยโครงสร้างประกอบไปด้วยอิมิตเตอร์ 1 ขั้วเบส 1 ขั้วและคอลเลคเตอร์ 1 ขั้ว กำหนดให้อิมิตเตอร์และเบสเป็นชนิดพี ส่วนเบสและฐานรองเป็นชนิดเอ็น ความแตกต่างของความหนาแน่นกระแสของอุปกรณ์จะถูกแสดงโดยเฉดสีต่างๆ ในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.2(ก) จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นกระแสที่ขั้วเบสมากกว่าขั้วคอลเลคเตอร์ นั่นหมายความว่ากระแสเบสมีค่ามากกว่ากระแสคอลเลคเตอร์ จึงต้องทำการปรับค่าออฟเซตให้เป็นศูนย์ก่อนการใช้งานแสดงดังรูปที่ 5.2(ข) ดังนั้นความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์จะมีค่าเป็นศูนย์



(ก)



(ข)

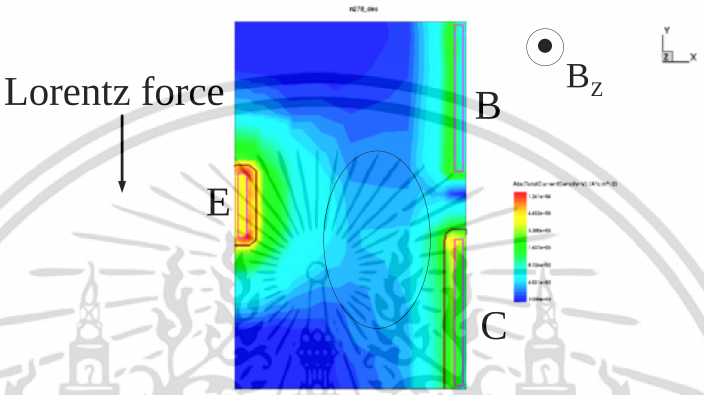
รูปที่ 5.2 ความหนาแน่นกระแสโดยการจำลองแบบ 3 มิติขณะไม่มีสนามแม่เหล็กในกรณี (ก) ไม่ได้ปรับค่าออฟเซต (ข) เมื่อปรับค่าออฟเซต

5.1.1 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Z ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา

การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Z ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ อาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องมาจากแรงลอเรนซ์ ส่งผลให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากทิศทางเดิม ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก B_Z ตั้งแต่ 0 ถึง 0.4 เทสลา ที่กระแสไบอัสอิมิตเตอร์ 1 mA และวัดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB})

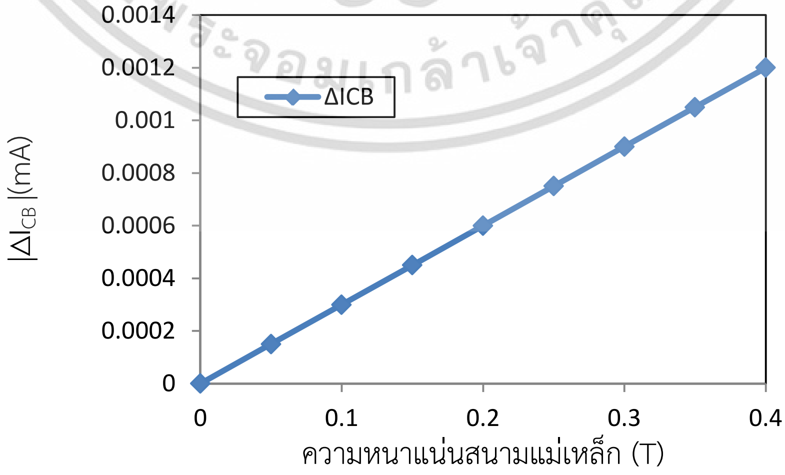
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.3 แสดงปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนพาหะ carrier deflection ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Z ที่ขั้ว E-B-C พาหะเคลื่อนที่ทิศทาง X ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_B และ I_C มีทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Z ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในทิศทาง -Y เป็นผลให้เกิดการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ ($\Delta I_{CB} \neq 0$) โดยกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถวัดได้โดยตรงที่ขั้วคอลเลคเตอร์และขั้วเบส



รูปที่ 5.3 การเบี่ยงเบนพาหะของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ขณะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Z

กราฟผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Z ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาที่สนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.4 เทสลาแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 ขณะมีสนามแม่เหล็กผ่านอุปกรณ์พาหะจะถูกเบี่ยงเบนเนื่องมาจากแรงลอเรนซ์ไปยังขั้วคอลเลคเตอร์ดังที่อธิบายไป ซึ่งการเบี่ยงเบนที่เกิดทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบส ($\Delta I_{CB} \neq 0$) โดยหาความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสได้จาก $\Delta I_{CB} = I_C - I_B$



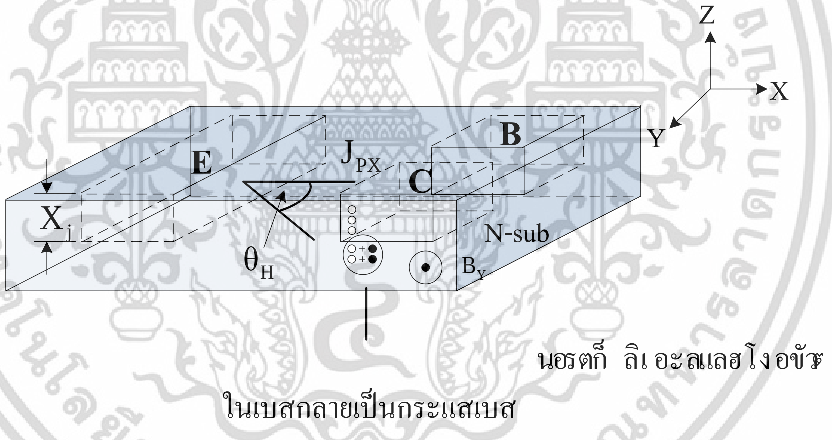
รูปที่ 5.4 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง Z ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองแบบใช้กระแสไบอัส I_E = 1 mA ซึ่งจากผลการจำลองพบว่า เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้การเปลี่ยนแปลงค่ากระแสเอาท์พุทมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยในลักษณะเชิงเส้น อธิบายจากสมการ (2.38) $\tan\theta_H = \mu_p.B_Z$ เมื่อความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กในทิศทาง Z มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้แรงลอเรนซ์ที่กระทำต่อพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้มุมที่เบี่ยงเบนมีค่ามากขึ้นดังนั้นจึงทำให้พาหะเบี่ยงเบนมากขึ้นทำให้ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

5.1.2 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Y ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา

รูปที่ 5.5 แสดงทิศทางของพาหะขณะมีสนามแม่เหล็ก B_Y ตัดผ่านแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอนอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัว (recombination) ในเบสกับพาหะสะสมที่คอลเลคเตอร์ กลไกในการเกิดความแตกต่างอาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection)



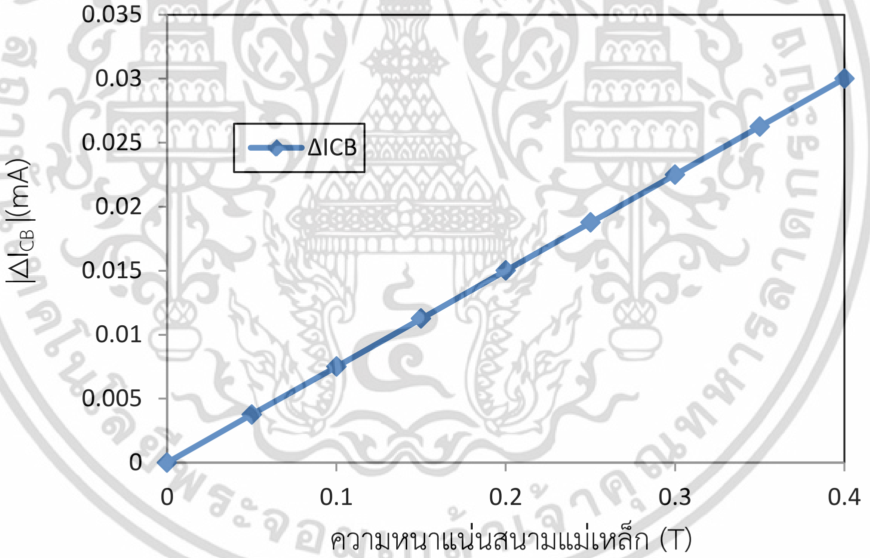
รูปที่ 5.5 ทิศทางของพาหะขณะมีสนามแม่เหล็ก B_Y

ทำการจำลองที่ค่ากระแสการทำงานอิมิตเตอร์ I_E = 1 mA เปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก 0 ถึง 0.4 เทสลา ในภาวะปกติไม่มีสนามแม่เหล็ก ($B_Y = 0$) ค่าความแตกต่างกระแสเอาท์พุทของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ที่วัดได้เท่ากับศูนย์ ($\Delta I_{CB}=0$) คือไม่เกิดความแตกต่างของกระแสทั้งสอง การทำงานในภาวะปกติของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาอธิบายมาแล้วจากรูปที่ 5.2 จากนั้นให้สนามแม่เหล็กกับอุปกรณ์ นั่นคือมีสนามแม่เหล็กแนวนอน (B_Y) ตัดผ่านตัวอุปกรณ์ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง –Z แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะโฮล ซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทาง X ทำให้พาหะโฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์และไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสกลายเป็นกระแสเบสโดยที่มีโฮลบางส่วนเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลคเตอร์จะกลายเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสคอลเลคเตอร์นั่นคือเกิดความไม่เท่ากันของกระแสทั้งสอง ($\Delta I_{CB} \neq 0$) ซึ่งจากโครงสร้างอุปกรณ์มีความลึกรอยต่อ (Xj) ที่ตื้นทำให้กระแสเบสที่ได้จากโฮลที่รวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสมีค่ามากกว่ากระแสคอลเลคเตอร์ซึ่งเกิดจากพาหะเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลคเตอร์อย่างมาก จึงทำให้กระแสเบสมีค่ามากขึ้นเนื่องจากโครงสร้างมีความลึกรอยต่อ (Xj) ที่ตื้นทำให้โฮลเปลี่ยนแปลงมุม θ_H เบี่ยงเบนเพียงเล็กน้อยสามารถไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสเบส

รูปที่ 5.6 แสดงกราฟผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Y ของอุปกรณ์ที่ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.4 เทสลา จากที่ได้อธิบายไปแล้วก่อนหน้านี้ เมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_Y ผ่านตัวอุปกรณ์ ผลของการรวมตัวใหม่และการเบี่ยงเบนของพาหะจะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบส ($\Delta I_{CB} \neq 0$) สามารถหาความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสได้แบบเดียวกับการตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_Z คือ $\Delta I_{CB} = I_C - I_B$ จากที่อธิบายข้างต้นกระแสเบสมีค่าเพิ่มขึ้นส่วนกระแสคอลเลคเตอร์มีค่าลดลงเมื่อนำกระแสคอลเลคเตอร์มาลบกับกระแสเบสจะได้ค่าที่อยู่ใน Q3 แต่เนื่องจากในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แสดงกราฟเอาท์พุทเป็นค่าสัมบูรณ์ดังนั้นกราฟที่ได้จึงพล็อตอยู่ใน Q1

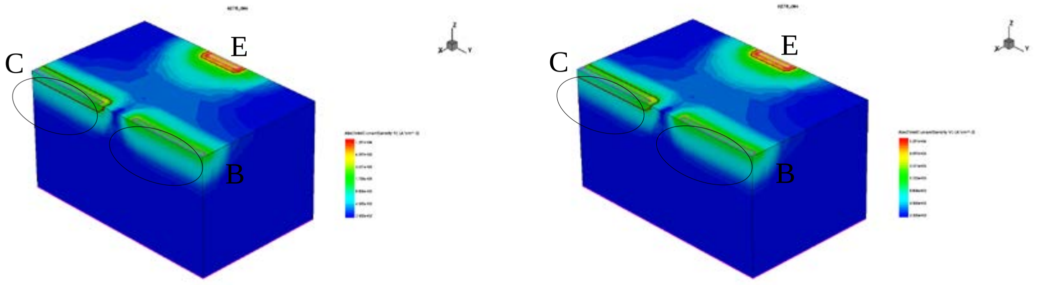


รูปที่ 5.6 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง Y ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา

5.1.3 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_X ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ แบบสามขา

ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_X ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาจะไม่ก่อให้เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากว่ากระแสมีทิศทางขนานกับสนามแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 5.7 (ก) ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กและ 5.7 (ข) เมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_X ผ่านอุปกรณ์ สังเกตได้ว่ากระแสไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเพราะฉะนั้นแมกนีโตทรานซิสเตอร์ไม่สามารถวัดสนามแม่เหล็ก B_X ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

รูปที่ 5.7 ผลการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา (ก) ไม่มีสนามแม่เหล็กและ (ข) เมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_X

5.2 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

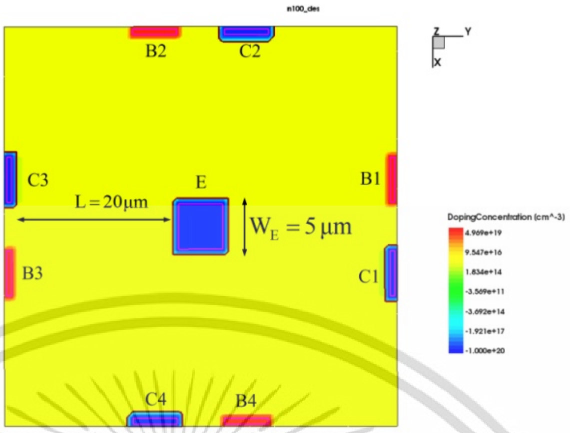
จากผลการจำลองแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาข้างต้นเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ ซึ่งอธิบายได้ว่าแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้ทั้งแนวดิ่งและแนวนอนโดยที่สนามแม่เหล็กที่ผ่านตัวอุปกรณ์ต้องมีทิศทางตั้งฉากกับกระแสแต่ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับกระแสจะไม่เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะ จากหัวข้อ 5.1.3 ถ้าต้องการวัดสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X ต้องทำการขยับอุปกรณ์ให้กระแสมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงได้พัฒนาโครงสร้างของอุปกรณ์ขึ้นมาใหม่เพื่อให้สามารถวัดสนามแม่เหล็กได้ทั้ง 3 แกน(B_X, B_Y, B_Z) โดยที่ไม่ต้องขยับอุปกรณ์ โครงสร้างที่พัฒนาขึ้นมาใหม่เรียกว่า “แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน” โดยพัฒนามาจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทางคณะผู้วิจัยได้เคยนำเสนอมาแล้ว[19] ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน อีกทั้งแสดงผลเปรียบเทียบค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแต่ละทิศทาง, กระแสอิมิตเตอร์ค่าต่างๆ รวมถึงวิเคราะห์กลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนอีกด้วย

5.2.1 โครงสร้างของอุปกรณ์

โครงสร้างการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน แสดงดังรูปที่ 5.8 อุปกรณ์พัฒนามาจากการรวมกันของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา 4 ตัวโดยใช้อิมิตเตอร์ร่วมกันแต่ขั้วเบสและขั้วคอลเลคเตอร์แยกจากกัน โครงสร้างจะให้กระแสไหลออกไปในทิศทางทั้ง 4 โดยที่กระแสจะต้องตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กทั้ง 3 แกน ดังนั้นโครงสร้างจะประกอบไปด้วยอิมิตเตอร์ 1 ขั้วเบส 4 ขั้วและคอลเลคเตอร์ 4 ขั้ว ซึ่งขั้วที่เพิ่มขึ้นมาจะช่วยให้อุปกรณ์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทาง B_X, B_Y และ B_Z ได้โดยที่ไม่ต้องขยับอุปกรณ์ กำหนดให้อิมิตเตอร์และเบสเป็นชนิดพี ส่วนเบสและฐานรองเป็นชนิดเอ็น ความลึกของรอยต่อ(Xj) มีค่า 1 ไมโครเมตร มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

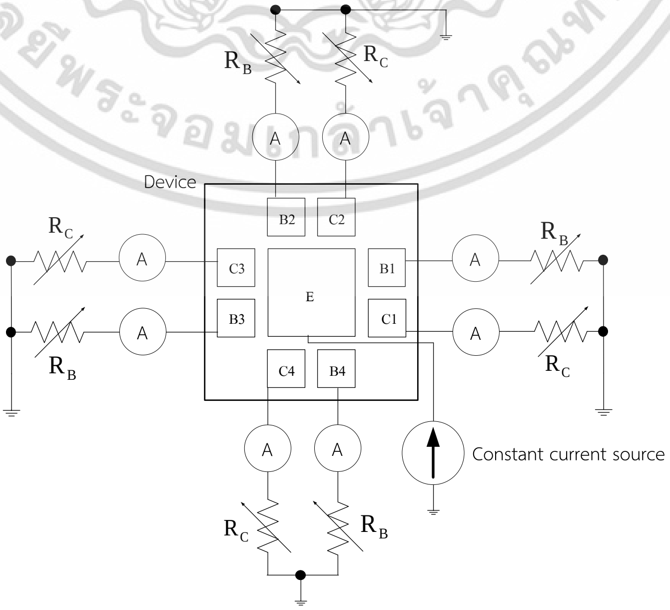
ความกว้างของอิมิตเตอร์(W_E) 5 ไมโครเมตรและระยะการเบี่ยงเบนของพาหะ(L) 20 ไมโคตรเมตรซึ่งค่าดังกล่าวให้ค่าความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ดี[26]



รูปที่ 5.8 โครงสร้างการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

5.2.2 ขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก

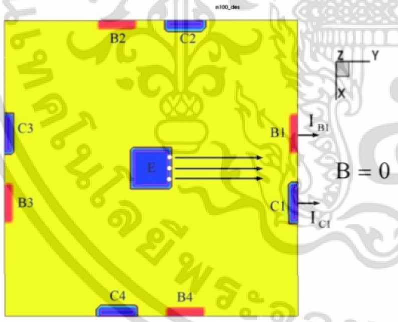
จากรูปที่ 5.9 แสดงวงจรการวัดผลการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน ขั้วอิมิตเตอร์จะถูกไบอัสด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ กระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์สามารถวัดได้ที่ขั้วเบสและขั้วคอลเลคเตอร์ตามลำดับ ตัวต้านทาน R_B จะต่อเข้ากับขั้วเบสและตัวต้านทาน R_C จะต่อเข้ากับขั้วคอลเลคเตอร์เพื่อปรับค่าออฟเซตระหว่างขั้วเบสและขั้วคอลเลคเตอร์ให้เป็นศูนย์ก่อนเริ่มใช้งาน โดยที่การต่อตัวต้านทานนั้นจะทำการต่อเฉพาะขั้วที่ต้องทำการวัดเท่านั้นขั้วที่ไม่ได้ทำการวัดจะไม่ต่อตัวต้านทาน



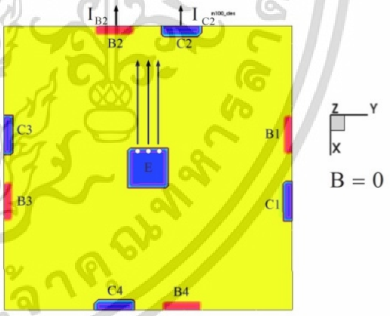
รูปที่ 5.9 วงจรวัดผลการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

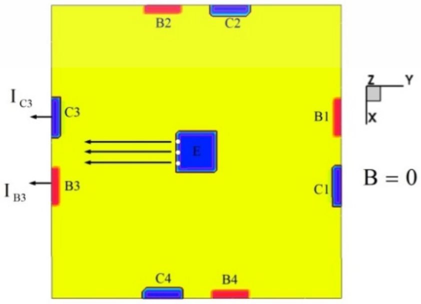
การทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนอาศัยหลักการเดียวกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาคืออาศัยผลของการรวมตัวใหม่ (recombination)และการเบี่ยงเบนของพาหะ(carrier deflection) เนื่องมาจากแรงลอเรนซ์ ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กผ่านตัวอุปกรณ์และตั้งฉากกับทิศทางกระแสทำให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระเบสและกระแสคอลเลคเตอร์($\Delta I_{CB} \neq 0$) ในภาวะปกติที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านอุปกรณ์และได้รับการไบอัสไปข้างหน้า (Forward Bias) ขั้วอิมิตเตอร์ที่มีพาหะส่วนมากคือโฮลจะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปยังขั้วเบสและรวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสกลายเป็นกระแสเบสและจะมีพาหะโฮลส่วนหนึ่งเคลื่อนที่ไปยังขั้วคอลเลคเตอร์กลายเป็นกระแสคอลเลคเตอร์ รูปที่ 5.10(ก) แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะในทิศทาง Y ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านที่ขั้ว E-B1-C1 รูปที่ 5.10(ข) แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะในทิศทาง –X ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านที่ขั้ว E-B2-C2 รูปที่ 5.10(ค) แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะในทิศทาง –Y ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านที่ขั้ว E-B3-C3 และรูปที่ 5.10(ง) แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะในทิศทาง X ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านที่ขั้ว E-B4-C4 เนื่องจากการปรับออฟเซตดังที่อธิบายไปก่อนหน้านี้ทำให้ขั้วคอลเลคเตอร์และขั้วเบส ได้รับปริมาณพาหะเท่าๆกันทำให้กระแสคอลเลคเตอร์(I_C) และกระแสเบส(I_B) เท่ากัน ไม่เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์($\Delta I_{CB}=0$) จากนั้นทำการวัดกระแสเอาท์พุทระหว่างเบสและคอลเลคเตอร์เพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงในสภาวะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทาง B_X, B_Y และ B_Z



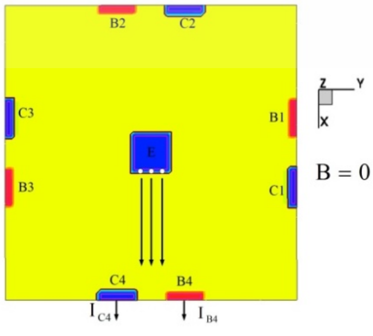
(ก)



(ข)



(ค)



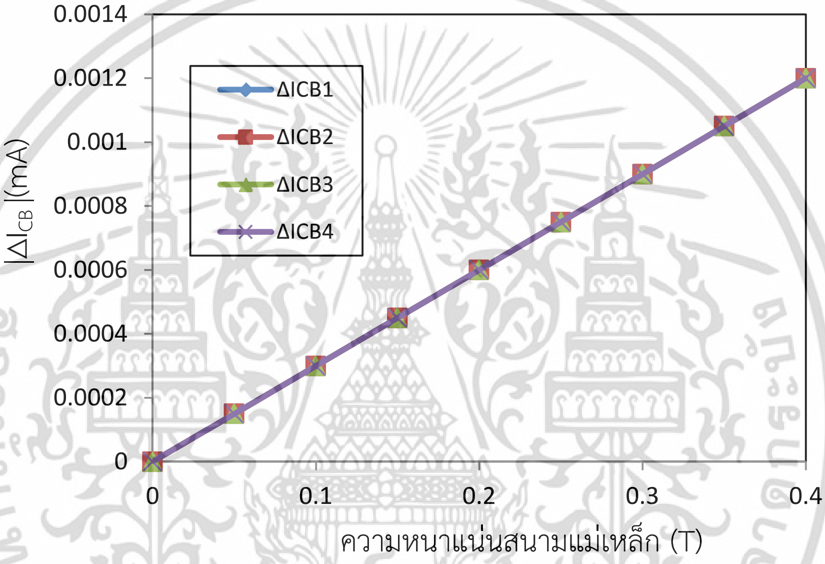
(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

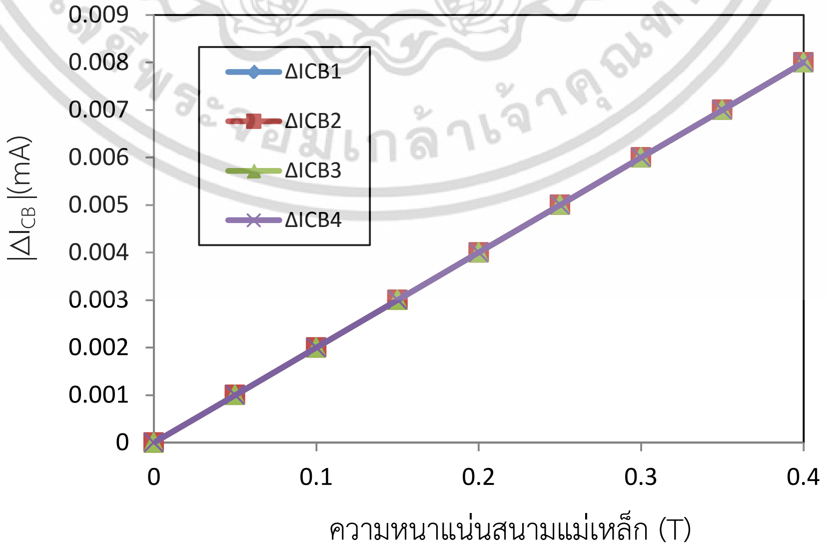
รูปที่ 5.10 การเคลื่อนที่ของพาหะขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน(B=0) (ก) E-B1-C1 (ข) E-B2-C2 (ค) E-B3-C3 (ง) E-B4-C4

5.2.3 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Z ที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกันของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

รูปที่ 5.11 แสดงกราฟผลการจำลองแบบการตอบสนองสนามแม่เหล็กในทิศทาง B_Z ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.4 เทสลา ทำการไบอัสที่กระแสอิมิตเตอร์ 1, 3, และ 5mA วัดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ ΔI_{CB} ในแต่ละขั้วของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

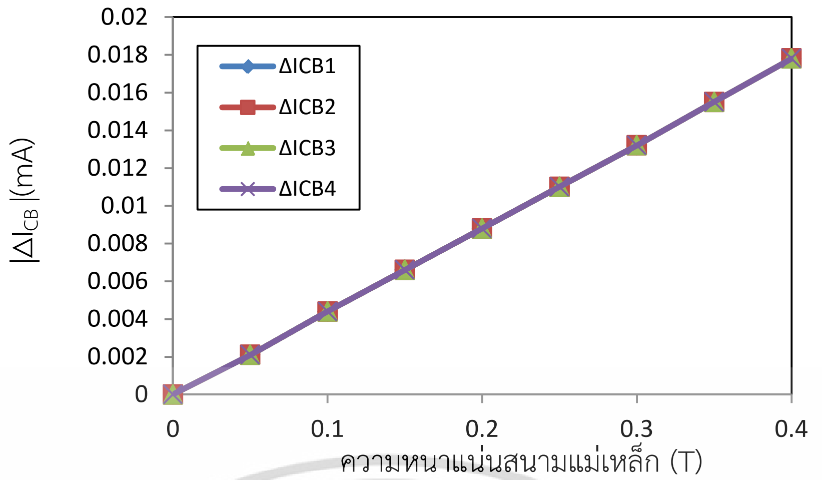


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

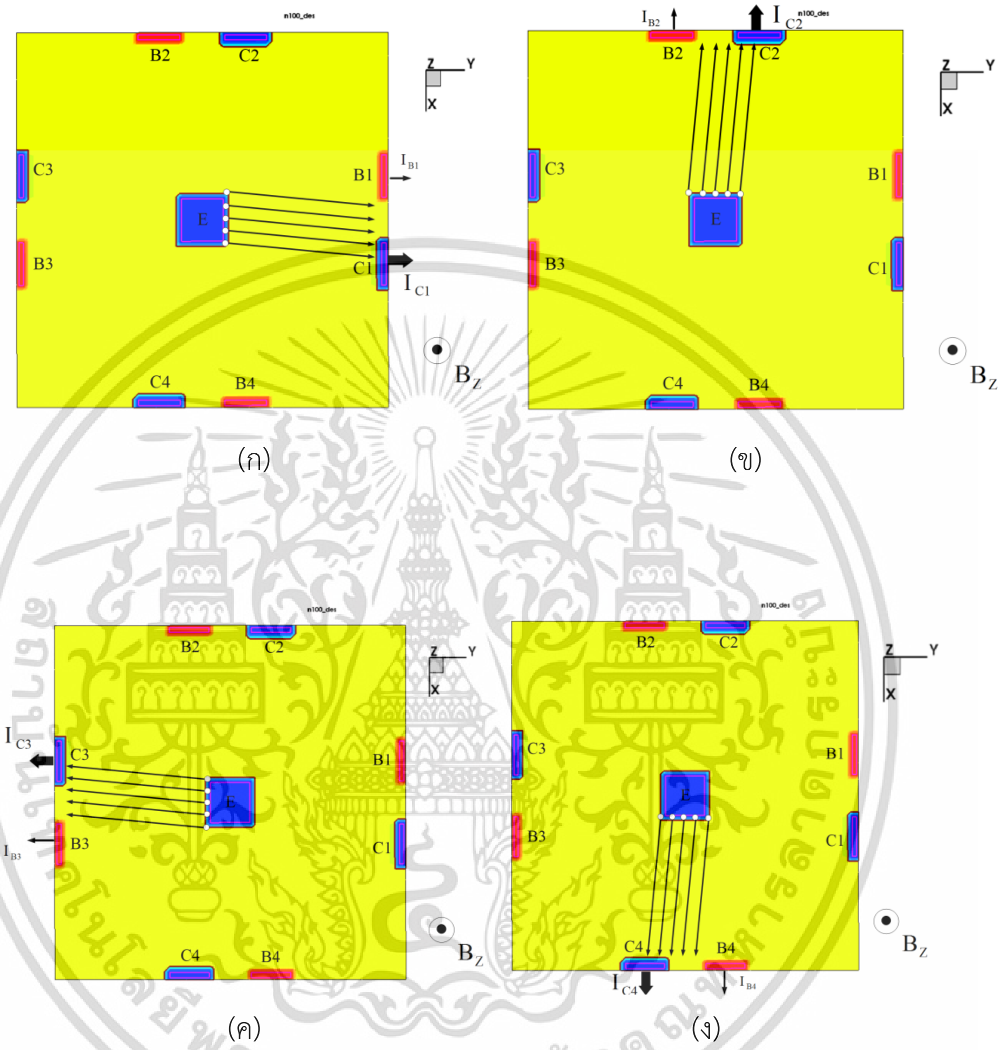
รูปที่ 5.11 ผลการจำลองแบบการตอบสนองสนามแม่เหล็ก B_Z ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนที่กระแสอิมิตเตอร์ (ก)1, (ข)3 และ (ค)5mA

จากการจำลองแบบรูปที่ 5.11 เมื่อทำการเพิ่มค่ากระแสการทำงานอิมิตเตอร์จาก 1mA เป็น 3 mA และ 5mA กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน มีความชันเพิ่มขึ้น นั่นคือค่าความแตกต่างของกระแสเอาท์พุทที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์ จากสมการ (2.40) $\Delta I_{CB} = J_{PY}.W_E.L.\tan\theta_H$ การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์เป็นการเพิ่มปริมาณการฉีดพาหะโฮล จากอิมิตเตอร์ไปคอลเลคเตอร์และเบสมากขึ้นทำให้ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์มีค่ามากขึ้น โดยจากการทดลองที่กระแสการทำงาน 5mA ค่าเอาท์พุทที่วัดได้มีค่าสูงที่สุด และจากรูปที่ 5.11 สังเกตได้ว่ากราฟกระแสเอาท์พุทที่ได้มีค่าเท่ากันในแต่ละขั้วที่ใช้งานเพราะว่าโครงสร้างมีความสมมาตรในการวัดสนามแม่เหล็ก B_Z คือไม่ว่าจะวัดจากขั้วเบสและขั้วคอลเลคเตอร์คู่ไหน จะได้ค่ากระแสเอาท์พุทที่เท่ากันเสมอ

รูปที่ 5.12 แสดงปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนพาหะ(carrier deflection) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Z ซึ่งการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะมีการตอบสนองในทุกๆขั้วที่ใช้งาน โดยรูปที่ 5.12(ก) ที่ขั้ว E-B1-C1 พาหะเคลื่อนที่ทิศทาง Y ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_{B1} และ I_{C1} มีทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Z ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในทิศทาง X เป็นผลให้พาหะเบี่ยงเบนทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบส(I_{B1}) และกระแสคอลเลคเตอร์(I_{C1}) ส่งผลให้ $\Delta I_{CB(1)} \neq 0$ รูปที่ 5.12(ข) ขั้ว E-B2-C2 พาหะเคลื่อนที่ในทิศทาง -X ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_{B2} และ I_{C2} มีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก B_Z ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในทิศทาง Y เป็นผลให้ $\Delta I_{CB(2)} \neq 0$ รูปที่ 5.12(ค) ที่ขั้ว E-B3-C3 พาหะเคลื่อนที่ในทิศทาง –Y ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_{B3} และ I_{C3} มีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก B_Z ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในทิศทาง -X เป็นผลให้ $\Delta I_{CB(3)} \neq 0$ รูปที่ 5.12(ง) ที่ขั้ว E-B4-C4 พาหะเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทิศทาง X ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_{B4} และ I_{C4} มีทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Z ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในทิศทาง –Y พาหะเกิดการเบี่ยงเบนส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบส(I_{B4}) และกระแสคอลเลคเตอร์(I_{C4}) หรือ $\Delta I_{CB(4)} \neq 0$



รูปที่ 5.12 ทิศทางการเบี่ยงเบนของพาหะขณะตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_Z (ก) E-B1-C1 (ข) E-B2-C2 (ค) E-B3-C3 (ง) E-B4-C4

5.2.4 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Z จากการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก(sensitivity) ทิศทาง B_Z จากการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ I_E=1,3 และ 5 mA โดยทำการเปรียบเทียบค่าความไวของแต่ละขั้วที่ใช้งานซึ่งสามารถคำนวณค่าความไวได้ตามสมการ $S_R=\Delta I_{CB}/I_E \Delta B$ จากค่ากระแสอิมิตเตอร์ต่างๆในการทดลอง ที่กระแสอิมิตเตอร์ 5 mA มีค่าความไวสูงที่สุดในทุกๆขั้วที่ใช้งานคือ 0.0089 T^{-1}

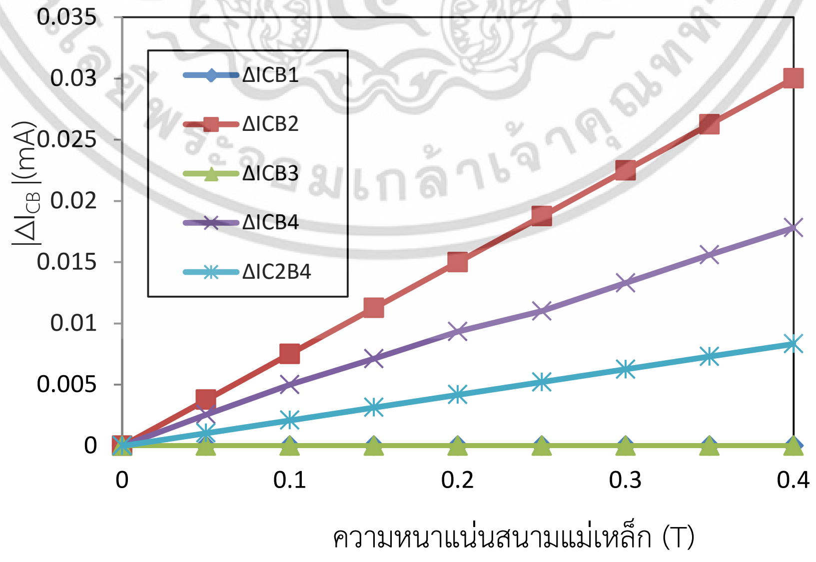
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Z จากการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

กระแสอิมิตเตอร์ (mA)	ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก(T^{-1})			
	E-B1-C1	E-B2-C2	E-B3-C3	E-B4-C4
1	0.003	0.003	0.003	0.003
3	0.0067	0.0067	0.0067	0.0067
5	0.0089	0.0089	0.0089	0.0089

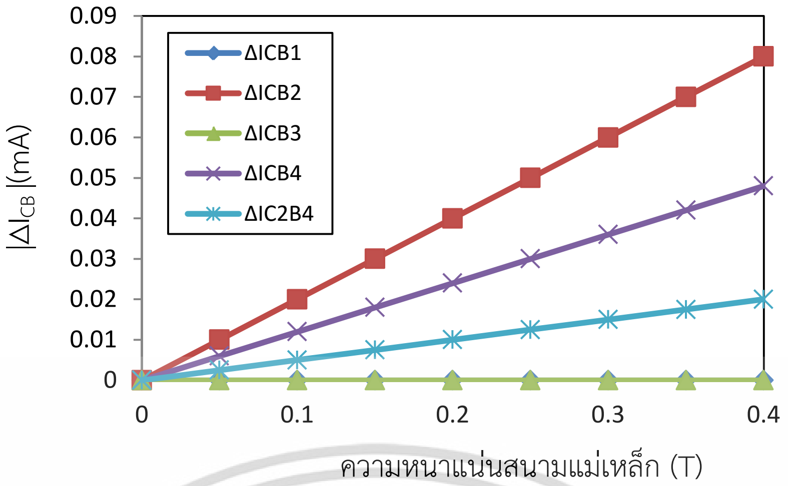
5.2.5 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Y ที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกันของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

รูปที่ 5.13 กราฟแสดงผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง B_Y ทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.4 เทสลา ทำการไบอัสที่กระแสอิมิตเตอร์ 1, 3, และ 5mA วัดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB}) ในแต่ละขั้วที่ต้องการใช้งานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน โดยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่ขั้ว E-B2-C2, E-B4-C4 และ E-B4-C2 ส่วนที่ขั้ว E-B1-C1 และ E-B3-C3 กระแสเอาท์พุทไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

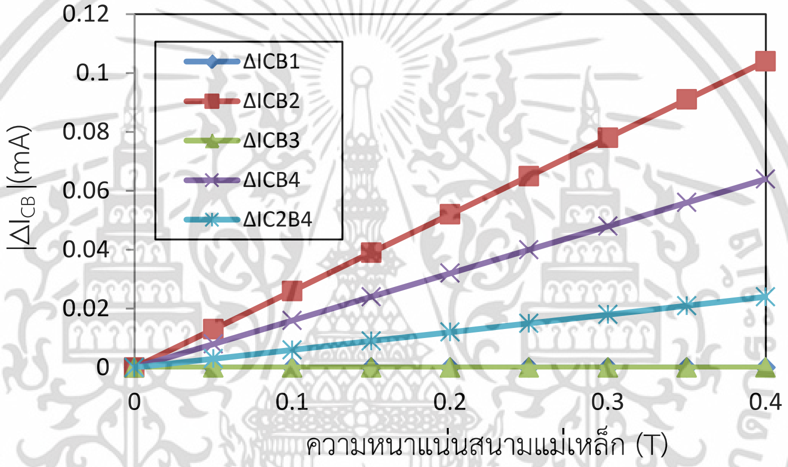


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)

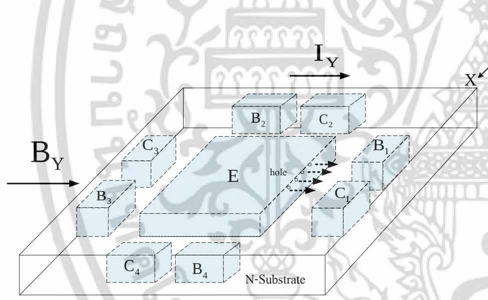
รูปที่ 5.13 ผลการจำลองแบบการตอบสนองสนามแม่เหล็ก B_Y ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนที่กระแสอิมิตเตอร์ (ก)1, (ข)3 และ (ค)5mA

การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.4 เทสลา จากผลการทดลองรูปที่ 5.13 กราฟมีความชันเพิ่มขึ้นแสดงถึงค่าความแตกต่างของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์(ΔI_{CB}) ที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กแรงลอเรนซ์มีแรงกระทำกับพาหะมากขึ้น พาหะถูกแรงกระทำจากแรงลอเรนซ์มากขึ้นทำให้พาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในมุมที่กว้างขึ้น ส่งผลให้ความแตกต่างของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์(ΔI_{CB})มีค่ามากขึ้นดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.1.1

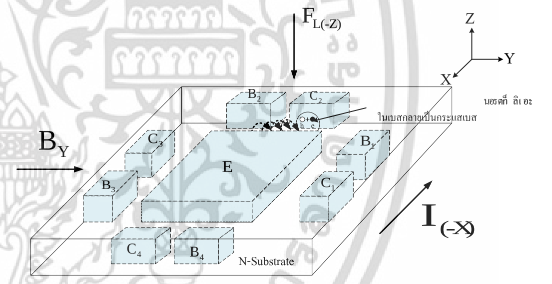
รูปที่ 5.14 แสดงการเบี่ยงเบนของพาหะและสามารถวิเคราะห์ได้จากพฤติกรรมของโฮล ซึ่งเป็นพาหะส่วนมากในอิมิตเตอร์ พาหะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้าที่ขั้วต่างๆของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน รูปที่ 5.14(ก) ที่ขั้ว E-B1-C1 พาหะเคลื่อนที่ในทิศทาง Y ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_Y แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทาง B_Y ทิศทางของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

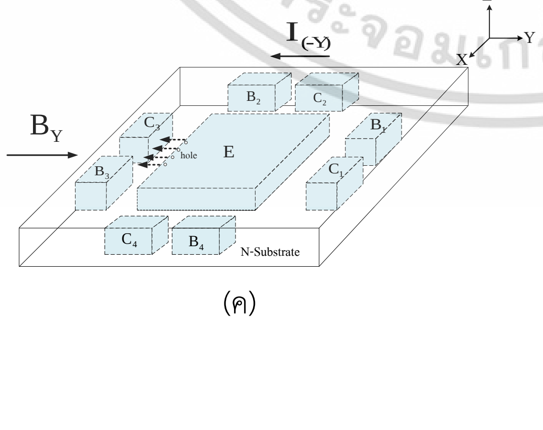
สนามแม่เหล็กกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าเป็นทิศทางเดียวกันไม่เกิดการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะ โดยกระแสเบส B1 เท่ากับกระแสคอลเลคเตอร์ C1 ไม่เกิดความแตกต่างของกระแสทั้งสอง ($\Delta I_{CB(1)}=0$) รูปที่ 5.14(ข) ที่ขั้ว E-B2-C2 พาหะเคลื่อนที่ในทิศทาง –X ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า $I_{(-X)}$ มีทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก B_Y ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง –Z กระทำกับพาหะทำให้พาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์ พาหะโฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนในฐานรองรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่เป็นพาหะส่วนมากในฐานรองเป็นผลให้กระแสเบสสูงขึ้นตรงข้ามกับกระแสคอลเลคเตอร์ที่ลดลง เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์($\Delta I_{CB(2)}\neq 0$) รูปที่ 5.14(ค) ที่ขั้วE-B3-C3 พาหะเคลื่อนที่ในทิศทาง –Y ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า $I_{(-Y)}$ การตัดผ่านของสนามแม่เหล็กให้ผลเช่นเดียวกับขั้ว E-B1-C1 นั่นคือไม่เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากทิศทางของกระแสไฟฟ้าเป็นทิศเดียวกับสนามแม่เหล็ก($\Delta I_{CB(3)}=0$) รูปที่ 5.14(ง) ที่ขั้วใช้งาน E-B4-C4 พาหะเคลื่อนที่ในทิศทาง X ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_X ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก B_Y ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง Z กระทำกับพาหะทำให้เคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปสะสมบริเวณผิวหน้าของอุปกรณ์เป็นผลให้กระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ไม่เท่ากันเกิดความแตกต่างของกระแสทั้งสอง($\Delta I_{CB(4)}\neq 0$)



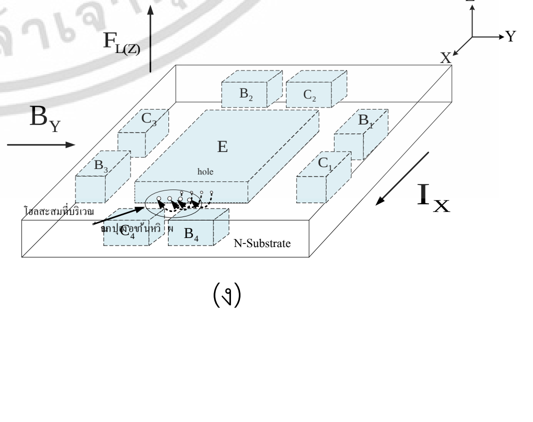
(ก)



(ข)

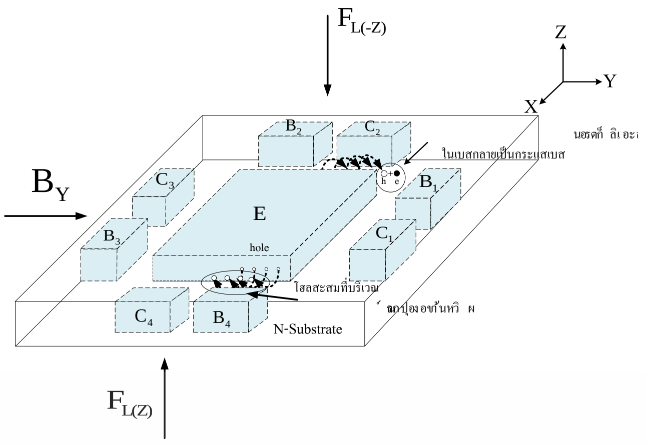


(ค)



(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)

รูป 5.14 ทิศทางการเบี่ยงเบนของพาหะโฮลขณะมีสนามแม่เหล็ก B_Y ตัดผ่าน (ก) E-B1-C1 (ข) E-B2-C2 (ค) E-B3-C3 (ง) E-B4-C4 (จ) E-B4-C2

สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_Y โดยใช้ขั้ว C2 และขั้ว B4 สามารถทำได้เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า โดยในรูปที่ 5.14(จ) แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 พาหะโฮลจะเบี่ยงเบนเข้าไปในฐานรองหรือทิศทาง -Z การรวมตัวของอิเล็กตรอนในฐานรองซึ่งมีชนิดเหมือนกับเบสจะทำให้เกิดเป็นกระแสเบส ผลที่เกิดขึ้นจะทำให้กระแสเบส(I_{B2})มีค่าเพิ่มขึ้นและกระแสคอลเลคเตอร์มีค่าลดลง(I_{C2}) และที่แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 4 พาหะโฮลจะถูกเบี่ยงเบนไปยังทิศทาง Z หรือไปสะสมบริเวณผิวหน้าของอุปกรณ์ ซึ่งการเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้กระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและกระแสเบสก็มีค่าลดลงเล็กน้อยเช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสของขั้ว C2 และขั้ว B4 ($\Delta I_{C2B4} \neq 0$) จึงทำให้สามารถใช้ขั้ว C2 และขั้ว B4 ตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_Y ได้ [27]

5.2.6 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Y จากการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Y ของอุปกรณ์ที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ I_E=1,3 และ 5 mA ทำการเปรียบเทียบค่าความไวที่ขั้วใช้งานระหว่าง E-B2-C2, E-B4-C4 และ E-B4-C2 ซึ่งสามารถคำนวณค่าความไวได้ตามสมการ $S_R=\Delta I_{CB}/I_E\Delta B$ จากค่ากระแสไบอัสอิมิตเตอร์ต่างๆในการทดลอง ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA มีค่าความไวสูงที่สุดคือ 0.075 T^{-1}, 0.045 T^{-1} และ 0.021 T^{-1} ที่ขั้ว E-B2-C2, E-B4-C4 และ E-B4-C2 ตามลำดับ

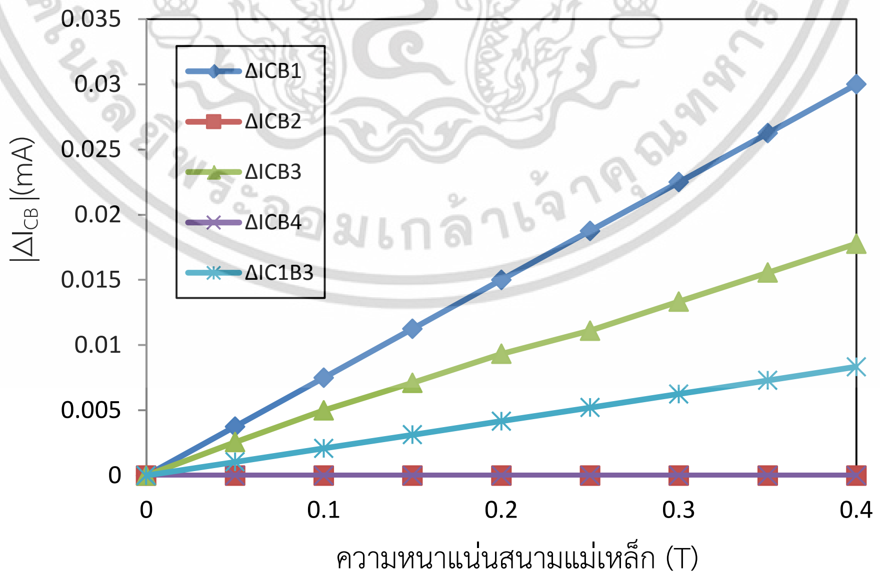
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Y จากการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

กระแสอิมิตเตอร์ (mA)	ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก(T^{-1})				
	E-B1-C1	E-B2-C2	E-B3-C3	E-B4-C4	E-B4-C2
1	-	0.075	-	0.045	0.021
3	-	0.067	-	0.04	0.017
5	-	0.052	-	0.032	0.012

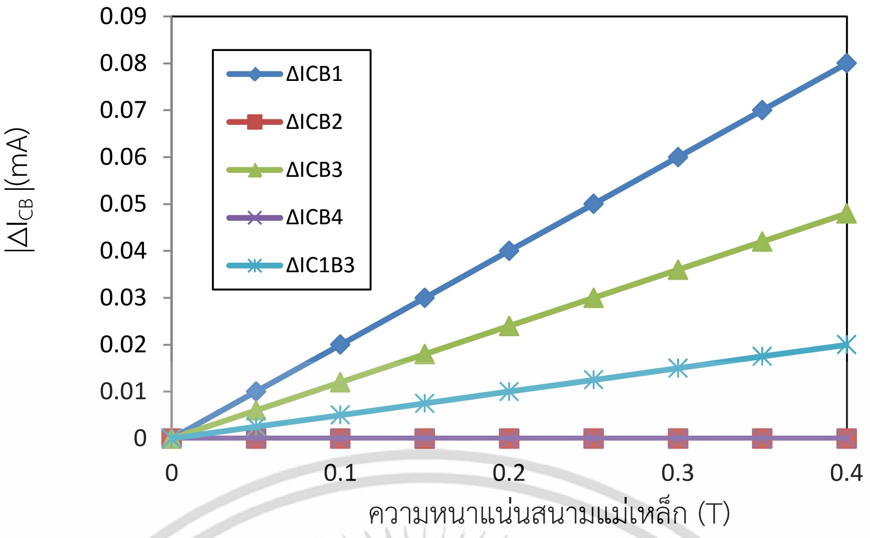
5.2.7 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_X ที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าแตกต่างกันของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

รูปที่ 5.15 แสดงผลการทดลองการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง B_X ทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.4 เทสลา ทำการไบอัสที่กระแสอิมิตเตอร์ 1,3 และ 5 mA และวัดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์(ΔI_{CB}) ในแต่ละขั้วของอุปกรณ์ ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 5.2.3 และ 5.2.5 โดยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่ขั้ว E-B1-C1, E-B3-C3 และ E-B3-C1 ส่วนที่ขั้ว E-B2-C2 และ E-B4-C4 กระแสเอาท์พุทไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

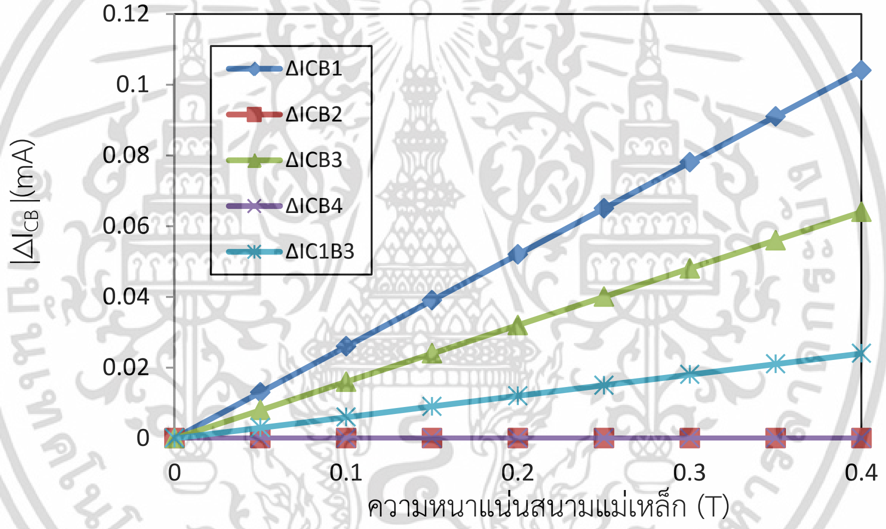


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



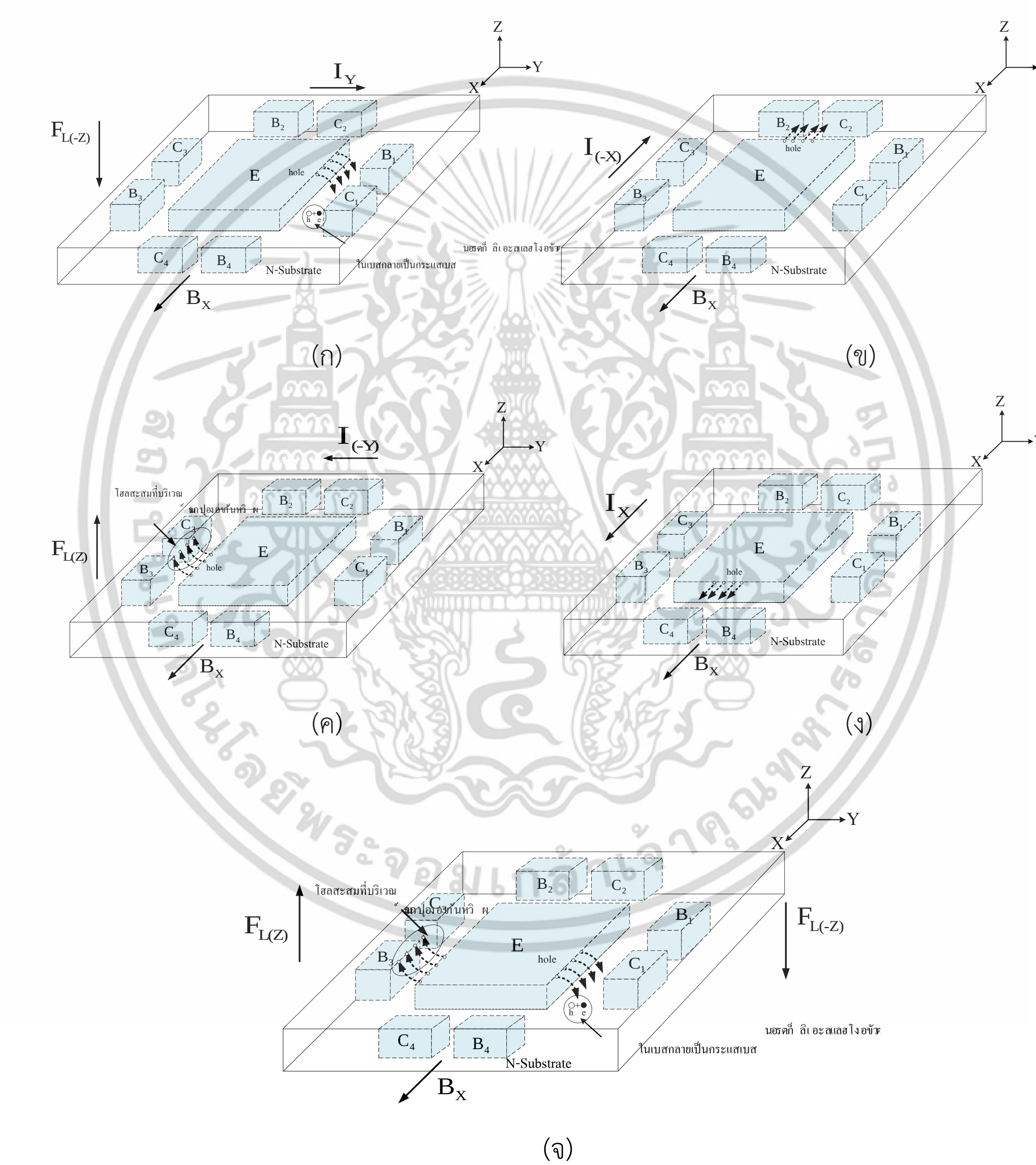
(ค)

รูปที่ 5.15 ผลการจำลองแบบการตอบสนองสนามแม่เหล็ก B_X ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนที่กระแสอิมิตเตอร์ (ก)1, (ข)3 และ (ค)5mA

รูปที่ 5.16 แสดงปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนพาหะ(carrier deflection) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากในอิมิตเตอร์จะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า รูปที่ 5.16(ก) ที่ขั้ว E-B1-C1 พาหะเคลื่อนที่ทิศทาง Y ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_Y มีทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในทิศทาง –Z เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบส B1 และกระแสคอลเลคเตอร์ C1 ($\Delta I_{CB(1)} \neq 0$) รูปที่ 5.16(ข) ที่ขั้ว E-B2-C2 พาหะเคลื่อนที่ในทิศทาง –X ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า $I_{(-X)}$ มีทิศขนานกับสนามแม่เหล็ก B_X นั่นคือไม่เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะกระแสเบส B2 และกระแสคอลเลคเตอร์ C2 มีค่าเท่ากัน ($\Delta I_{CB(2)}=0$) รูปที่ 5.16(ค) ที่ขั้ว E-B3-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C3 พาหะเคลื่อนที่ในทิศทาง –Y ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า $I_{(-Y)}$ การตัดผ่านของสนามแม่เหล็ก B_X ให้ผลเช่นเดียวกับขั้ว E-B1-C1 นั่นคือเกิดการเบี่ยงเบนของพาหะสะสมบริเวณผิวหน้าของอุปกรณ์เนื่องจากแรงลอเรนซ์ทิศทาง Z ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบส B3 และกระแสคอลเลคเตอร์ C3 ($\Delta I_{CB(3)} \neq 0$) รูปที่ 5.16(ง) ที่ขั้ว E-B4-C4 พาหะเคลื่อนที่ในทิศทาง X ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า I_X ขนานกับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X ทำให้ไม่เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะ กระแสเบส B4 และกระแสคอลเลคเตอร์ C4 มีค่าเท่ากัน ($\Delta I_{CB(4)}=0$)



รูป 5.16 ทิศทางการเบี่ยงเบนของพาหะโฮลขณะมีสนามแม่เหล็ก B_X ตัดผ่าน (ก) E-B1-C1 (ข) E-B2-C2 (ค) E-B3-C3 (ง) E-B4-C4 (จ) E-B3-C1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_X โดยใช้ขั้ว C1 และขั้ว B3 สามารถทำได้เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า โดยในรูปที่ 5.16(จ) แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 1 พาหะโฮลจะเบี่ยงเบนเข้าไปในฐานรองหรือทิศทาง -Z การรวมตัวของอิเล็กตรอนในฐานรองซึ่งมีชนิดเหมือนกับเบสจะทำให้เกิดเป็นกระแสเบส ผลที่เกิดขึ้นจะทำให้กระแสเบส(I_{B1}) มีค่าเพิ่มขึ้นและกระแสคอลเลคเตอร์มีค่าลดลง(I_{C1}) และที่แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 3 พาหะโฮลจะถูกเบี่ยงเบนไปยังทิศทาง Z หรือไปสะสมบริเวณผิวหน้าของอุปกรณ์ ซึ่งการเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้กระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและกระแสเบสก็มีค่าลดลงเล็กน้อยเช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 1 ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสของขั้ว C1 และขั้ว B3 ($\Delta I_{C1B3} \neq 0$) จึงทำให้สามารถใช้ขั้ว C1 และขั้ว B3 ตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_X ได้ [27]

5.2.8 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X จากการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ I_E=1,3 และ5 mA โดยเปรียบเทียบที่ขั้วใช้งาน ซึ่งจากค่ากระแสอิมิตเตอร์ต่างๆในการทดลอง ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA มีค่าความไวสูงที่สุดคือ 0.075 T^{-1}, 0.045 T^{-1} และ 0.021 T^{-1} ที่ขั้ว E-B1-C1, E-B3-C3 และ E-B3-C1 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X จากการจำลองแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

กระแสอิมิตเตอร์ (mA)	ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก(T^{-1})				
	E-B1-C1	E-B2-C2	E-B3-C3	E-B4-C4	E-B3-C1
1	0.075	-	0.045	-	0.021
3	0.067	-	0.04	-	0.017
5	0.052	-	0.032	-	0.012

จากโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนนอกจากการวัดสนามแม่เหล็กได้โดยการวัดทีละขั้วแล้ว อุปกรณ์สามารถวัดสนามแม่เหล็กแบบรวมกระแสได้[28] โดยสังเกตได้จากผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Y และ B_X ในหัวข้อ 5.2.5 และ 5.2.6 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่ากระแสเอาท์พุทที่วัดได้จากขั้วคู่ตรงข้ามกันมีค่าไม่เท่ากันซึ่งส่งผลให้แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนสามารถวัดสนามแม่เหล็กแบบรวมกระแสได้แต่จะไม่ขอกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

5.3 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริง

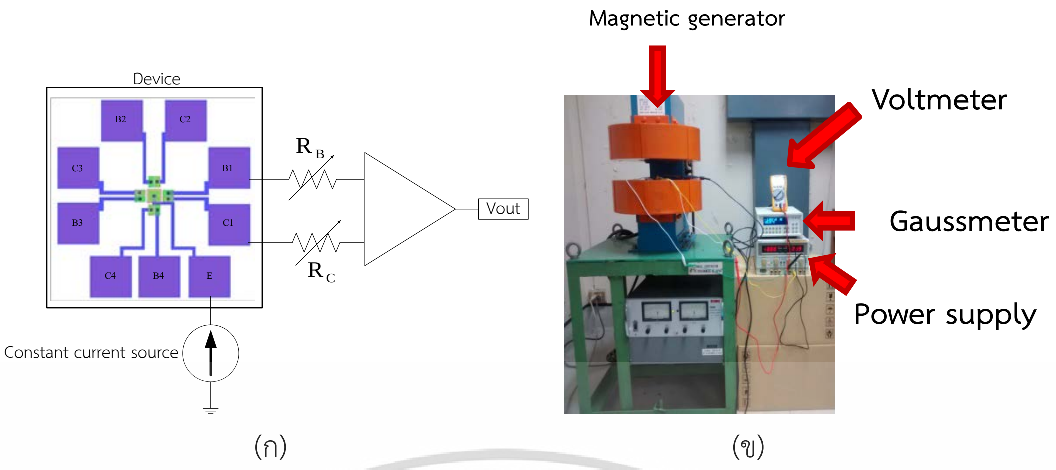
จากผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างดังกล่าวสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนได้ หลังจากนั้นเราจะทำการสร้างตัวอุปกรณ์จริงขึ้นมาเพื่อแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน จากการจำลองแบบสามารถใช้งานได้จริง และเพื่อสะดวกต่อการวัด ในการวัดสนามแม่เหล็กด้วยตัวอุปกรณ์จริงนั้นไม่ได้วัดกระแสเหมือนการจำลองแบบด้วยโปรแกรม TCAD Santaurus เนื่องมาจากปัญหาความยุ่งยากในการวัดแบบกระแส เพราะฉะนั้นเราจะทำการวัดแรงดันเอาท์พุทที่เกิดขึ้นขณะมีสนามแม่เหล็กผ่านตัวอุปกรณ์

5.3.1 วงจรวัดผลการทดลอง

ในการวัดผลการทดลองหรือการวัดการตอบสนองของอุปกรณ์ต่อสิ่งแวดล้อมที่ทำการวัดนั้นจำเป็นต้องมีการนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายนอกมาต่อร่วมกับอุปกรณ์ เพื่อให้สามารถวัดผลการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งอาจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดัน, กระแสไฟฟ้า หรือความต้านทาน เป็นต้น

ในการทดลองนี้วิธีการของการวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจะมีการนำอุปกรณ์ภายนอกมาต่อร่วมด้วยดังรูปที่ 5.17 ซึ่งเป็นการต่ออุปกรณ์เซ็นเซอร์เข้ากับวงจรวัดผล โดยประกอบด้วย อุปกรณ์เซ็นเซอร์, แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ ซึ่งทำหน้าที่ไบอัสแก่อุปกรณ์, ตัวต้านทาน R_B และ R_C ทำหน้าที่ในการปรับกระแสเบส (I_B) และกระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) สัญญาณที่ได้จะผ่านวงจรขยายสัญญาณเพื่อการแสดงค่าเอาท์พุทที่ชัดเจนขึ้น จากนั้นทำการวัดแรงดันเอาท์พุทระหว่างเบสและคอลเลคเตอร์เพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงในสภาวะที่มีสนามแม่เหล็ก B_X B_Y และ B_Z ตัดผ่านตัวอุปกรณ์ ในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กแรงดันเอาท์พุทของแมกนีโตทรานซิสเตอร์มีค่าเท่ากันที่ขั้วใช้งานต่างๆ โดยการปรับค่าออฟเซตระหว่างขั้วเบสกับขั้วคอลเลคเตอร์ให้มีค่าเป็นศูนย์โดยตัวต้านทาน R_B และ R_C ซึ่งตัวต้านทานจะต่อเข้ากับขั้วที่ทำการวัดผลเท่านั้นส่วนขั้วที่ไม่ได้ทำการวัดจะไม่ต่อกับตัวต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 การวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน (ก) วงจรวัดผล (ข) ระบบการวัดสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.17 (ข) แสดงการวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน โดยความเข้มสนามแม่เหล็กถูกปล่อยออกมาในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของอุปกรณ์จากเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสามารถวัดได้ผ่านทางเครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก (Lakeshore 475 DSP Gaussmeter) ซึ่งแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนถูกวางอยู่ภายในเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก โดยวางอยู่ตรงกลางระหว่างขั้วทั้งสองด้านของเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก ค่าเอาท์พุทของอุปกรณ์สามารถวัดผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายนอก โดยสามารถวัดแรงดันเอาท์พุทของอุปกรณ์ผ่านทางเครื่องมือวัดแรงดัน (Voltmeter)

ในการทดลองนี้พาหะโฮลจะถูกฉีด (Injection) จากอิมิตเตอร์ผ่านไปยังเบสกับคอลเลคเตอร์เกิดเป็นกระแสเบส (I_B) และกระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) ตามลำดับ โดยแสดงความสัมพันธ์นี้ได้จากสมการที่ (2.36) $I_E = I_B + I_C$

การวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ จะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันเอาท์พุทหรือแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาเบสกับขาคอลเลคเตอร์ (V-output หรือ V_{CB}) โดยในสภาวะปกติที่ปราศจากสนามแม่เหล็ก (B = 0) กระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์จะมีค่าเท่ากัน ทำให้แรงดันเอาท์พุท (V_{CB}) ที่วัดได้มีค่าเป็นศูนย์ แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กซึ่งมีทิศตั้งฉากกับกระแสของอุปกรณ์ ($B \neq 0$) จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะที่ฉีดจากอิมิตเตอร์ ส่งผลให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวเดิม โดยการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้กระแสเบสกับอิมิตเตอร์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ($\Delta I_{CB} \neq 0$) ซึ่งเมื่อวัดแรงดันเอาท์พุทระหว่างขาเบสกับคอลเลคเตอร์จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ได้ โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้จากสมการ (5.1) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta V_{CB} = \Delta I_C \cdot R_C - \Delta I_B \cdot R_B \tag{5.1}$$

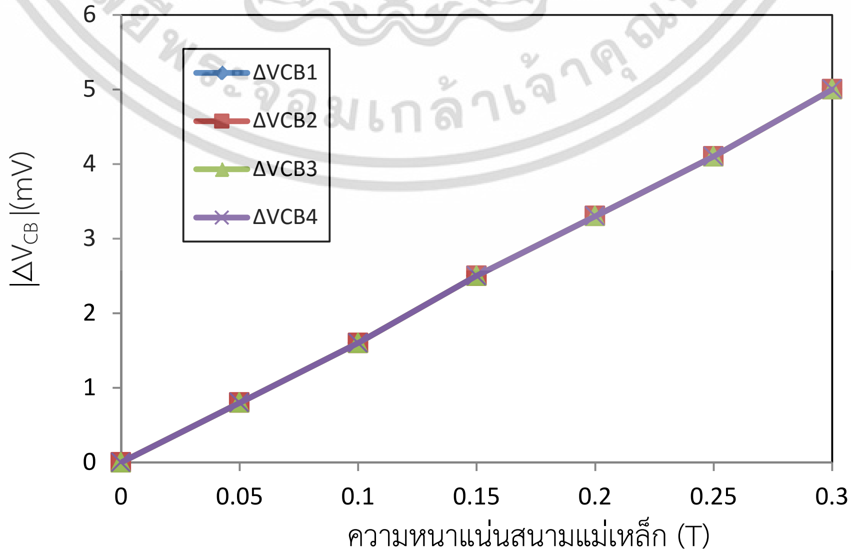
จากสมการข้างต้นเป็นสมการแสดงความสมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ ซึ่งแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้นี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก (sensitivity) ของอุปกรณ์ได้จากสมการที่ (5.2) ดังนี้

$$S_A = \frac{\Delta V_{CB}}{\Delta B} \tag{5.2}$$

โดยในหัวข้อนี้ การวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนที่สร้างขึ้นจริง จะพิจารณาจากค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ซึ่งคำนวณได้จากแรงดันเอาท์พุทที่วัดได้ต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่จ่ายให้อุปกรณ์

5.3.2 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Z ของอุปกรณ์ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA

ทำการวัดสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์โดยให้สนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.3 เทสลาแก่อุปกรณ์ และให้กระแสไบอัส 1 mA ที่ขั้วอิมิตเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ และทำการวัดผลแรงดันเอาท์พุทของขั้วเบสและขั้วคอลเลคเตอร์ (ΔV_{CB}) ของอุปกรณ์ในแต่ละขั้วที่ต้องการใช้งาน จากรูปที่ 5.18 ในขั้วการวัดทั้งสี่ได้ค่าแรงดันเอาท์พุทระหว่างขั้วเบสและขั้วคอลเลคเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ที่ขั้ว E-B1-C1, E-B2-C2, E-B3-C3 และ E-B4-C4 แสดงเป็นค่าเอาท์พุท ΔV_{CB1}, ΔV_{CB2}, ΔV_{CB3} และ ΔV_{CB4} ตามลำดับ



รูปที่ 5.18 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Z ของอุปกรณ์ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.18 เป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาท์พุท (V_{CB}) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านในแนวตั้งฉากกับผิวของอุปกรณ์ระหว่าง 0 ถึง 0.3 T โดยอุปกรณ์ที่ใช้มีความกว้างของขั้วฉีดพาหะ (W_E) เท่ากับ 5 ไมโครเมตร และระยะเบี่ยงเบนของพาหะ (L) เท่ากับ 20 ไมโครเมตรซึ่งจากการวัดผลการทดลองพบว่า เมื่อความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่เอาท์พุทมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยในลักษณะเชิงเส้น จากผลการทดลองที่วัดสังเกตได้ว่าค่าแรงดันเอาท์พุทจากขั้วที่ใช้งานต่างๆมีค่าเท่ากันเนื่องจากความสมมาตรของโครงสร้างในการวัดสนามแม่เหล็ก B_Z ทำให้ค่าแรงดันเอาท์พุทที่ได้จากการวัดแต่ละขั้วมีค่าเท่ากันซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับผลของการจำลองแบบ ส่วนกลไกการเบี่ยงเบนของพาหะเมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_Z ถูกอธิบายรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อ 5.2.3

5.3.3 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Z

สำหรับค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.2 ตารางที่ 5.4 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Z ของอุปกรณ์ที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ 1 mA โดยทำการเปรียบเทียบค่าความไวของแต่ละขั้วที่ใช้งานของอุปกรณ์ โดยที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA อุปกรณ์มีค่าความไว 16.53 mV/T ทุกๆขั้วที่ใช้งาน

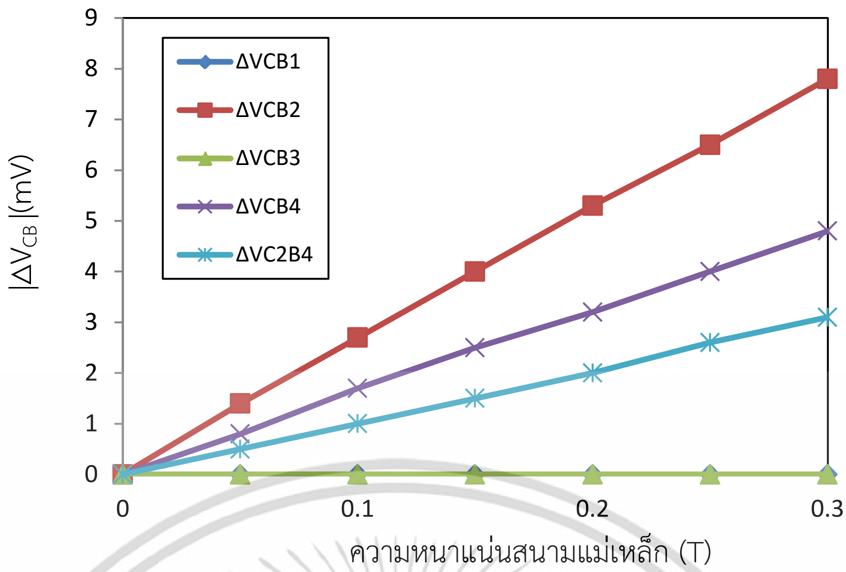
ตารางที่ 5.4 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Z ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA

กระแสอิมิตเตอร์ (mA)	ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก (mV/T)			
	E-B1-C1	E-B2-C2	E-B3-C3	E-B4-C4
1	16.53	16.53	16.53	16.53

5.3.4 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Y ของอุปกรณ์ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA

รูปที่ 5.19 แสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง B_Y ของอุปกรณ์โดยให้สนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.3 เทสลา และให้กระแสไบอัส 1 mA จากนั้นวัดแรงดันเอาท์พุทระหว่างขั้วเบสและขั้วคอลเลคเตอร์(ΔV_{CB}) ในแต่ละขั้วของอุปกรณ์ที่ต้องการวัด ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 5.3.2 โดยค่าแรงดันเอาท์พุทมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่ขั้ว E-B2-C2, E-B4-C4 และ E-B4-C2 ส่วนที่ขั้ว E-B1-C1 และ E-B3-C3 ไม่เกิดค่าแรงดันเอาท์พุทเนื่องจากไม่เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะดังที่อธิบายไว้ใน 5.2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_Y ของอุปกรณ์ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA

5.3.5 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Y

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Y ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ 1 mA ทำการเปรียบเทียบค่าความไวที่ขั้วใช้งาน E-B2-C2, E-B4-C4 และ E-B4-C2 โดยจากตารางค่าความไวที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA มีค่าความไว 26.22 mV/T, 16.11 mV/T และ10.24 mV/T ที่ขั้ว E-B2-C2, E-B4-C4 และ E-B4-C2 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.5 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_Y ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA

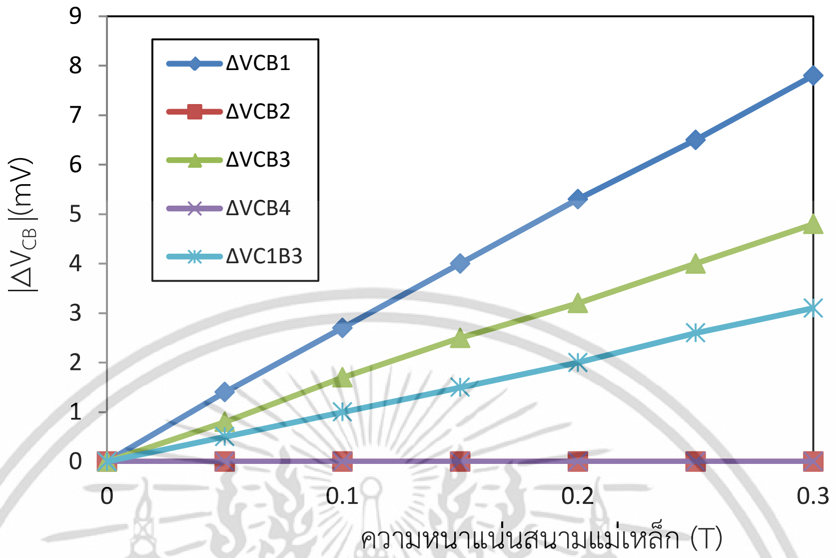
กระแสอิมิตเตอร์ (mA)	ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก (mV/T)				
	E-B1-C1	E-B2-C2	E-B3-C3	E-B4-C4	E-B4-C2
1	-	26.22	-	16.11	10.24

5.3.6 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_X ของอุปกรณ์ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA

รูปที่ 5.20 แสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ โดยเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.3 เทสลา ทำการไบอัสที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA จากนั้นวัดแรงดันเอาท์พุทระหว่างขั้วเบสและขั้วคอลเลคเตอร์(ΔV_{CB}) ในแต่ละขั้วของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตามที่ต้องการ ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 5.3.2 และ 5.3.4 โดยค่าแรงดันเอาท์พุทมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่ขั้ว E-B1-C1, E-B3-C3 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E-B3-C1 ส่วนที่ขั้ว E-B2-C2 และ E-B4-C4 ไม่เกิดค่าแรงดันเอาท์พุทเนื่องจากไม่เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะดังที่อธิบายไว้ใน 5.2.7



รูปที่ 5.20 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก B_X ของอุปกรณ์ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA

5.3.7 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X ของอุปกรณ์ที่กระแสการทำงานอิมิตเตอร์ 1 mA ทำการเปรียบเทียบค่าความไวที่ขั้วใช้งาน โดยจากตารางค่าความไวที่ได้มีค่า 26.22 mV/T, 16.11 mV/T และ 10.24 mV/T ที่ขั้ว E-B1-C1, E-B3-C3 และ E-B3-C1 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.6 ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X ที่กระแสอิมิตเตอร์ 1 mA

กระแสอิมิตเตอร์ (mA)	ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก (mV/T)				
	E-B1-C1	E-B2-C2	E-B3-C3	E-B4-C4	E-B3-C1
1	26.22	-	16.11	-	10.24

เมื่อเปรียบเทียบแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขากับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน จากผลการทดลองการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้นแสดงให้เห็นว่าแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X, B_Y และ B_Z ได้โดยที่ไม่ต้องขยับอุปกรณ์เนื่องมาจากการปรับปรุงและพัฒนาโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นมาใหม่ซึ่งมีการเพิ่มขั้วคอลเลคเตอร์และขั้วเบสขึ้นมาอย่างละ 3 คู่ สำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางขนานกับกระแส โดยจะมีแมกนีโตทรานซิสเตอร์อยู่ 1 คู่เสมอที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_X แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 1 และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 3 จะเกิดการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องมาจากแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะเพราะสนามแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าส่วนแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 4 จะไม่เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องมาจากทิศทางของสนามแม่เหล็ก B_X มีทิศทางขนานกับกระแสไฟฟ้าดังนั้นสามารถใช้ขั้ว E-B1-C1 หรือ E-B3-C3 หรือ E-B3-C1 ตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ B_X ได้เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงสรุปผลการวิจัย การตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน โดยเป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้คือ การพัฒนาโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ให้สามารถวัดสนามแม่เหล็ก B_X, B_Y และ B_Z ได้ โดยทั่วไปแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถวัดสนามแม่เหล็กได้เพียง 1 หรือ 2 ทิศทาง ในงานวิจัยนี้นำเสนอแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน ที่พัฒนามาจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทางคณะผู้วิจัยได้เคยนำเสนอมาแล้ว โดยทำการจำลองแบบด้วยโปรแกรม TCAD Sentaurus ก่อนว่าโครงสร้างที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดสนามแม่เหล็กทิศทาง B_X, B_Y, และ B_Z ได้หรือไม่ เพื่อเป็นการลดต้นทุนและเวลาในการทำงาน เมื่อผลการจำลองแบบที่ได้เป็นที่น่าพอใจแล้วจึงนำโครงสร้างดังกล่าวไปสร้างเป็นอุปกรณ์ขึ้นมา ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขา ไม่สามารถวัดสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางขนานกับกระแสไฟฟ้าได้เนื่องจากไม่เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะทำให้ไม่เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ ($\Delta I_{CB}=0$)

2. ความแตกต่างระหว่างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนที่พัฒนาและปรับปรุงขึ้นมาจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาคือ การสร้างขั้วคอลเลคเตอร์และขั้วเบสเพิ่มขึ้นมา อีก 3 คู่ เพื่อทำหน้าที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางที่ขนานกับกระแสไฟฟ้า ซึ่งขั้วที่เพิ่มขึ้นมาช่วยให้อุปกรณ์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางที่แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาตรวจจับไม่ได้

3. แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้โดยใช้หลักการทำงานเหมือนกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาคือการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และรวมตัวใหม่ของพาหะ (recombination) ซึ่งจะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB})

4. การตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนสามารถวัดสนามแม่เหล็ก B_X, B_Y และ B_Z ได้ เมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_X แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 1 และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 3 จะเกิดการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องมาจากแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะเพราะสนามแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าส่วนแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 4 จะไม่เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องมาจากทิศทางของสนามแม่เหล็ก B_X มีทิศทางขนานกับกระแสไฟฟ้าดังนั้นสามารถใช้ขั้ว E-B1-C1 หรือ E-B3-C3 หรือ E-B3-C1 ตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_X ได้ และเช่นเดียวกันเมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_Y แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 4 จะเกิดการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องมาจากแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะเพราะสนามแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าส่วนแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 1 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 3 จะไม่เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องมาจากทิศทางของสนามแม่เหล็ก B_Y มีทิศทางขนานกับกระแสไฟฟ้าดังนั้นสามารถใช้ขั้ว E-B2-C2 หรือ E-B4-C4 หรือ E-B4-C2 ตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_Y ได้ ส่วนในกรณีเมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_Z แต่ละขั้วของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้เหมือนกันหมดเพราะสนามแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า ดังนั้นสามารถใช้ขั้ว E-B1-C1 หรือ E-B2-C2 หรือ E-B3-C3 หรือ E-B4-C4 ตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_Z ได้

5. การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานอิมิตเตอร์ I_E แสดงถึงปริมาณการฉีดพาหะจากอิมิตเตอร์ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ปริมาณพาหะที่เบี่ยงเบนมากขึ้นนั่นคือความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์มีค่ามากขึ้นและปริมาณความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมีผลต่อมุมการเบี่ยงเบนของพาหะส่งผลให้ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

6. แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนที่สร้างขึ้นจริงสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็ก B_X, B_Y และ B_Z ได้ ซึ่งผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ได้ มีผลสอดคล้องกับผลของการจำลองแบบที่ได้ทำไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

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

[2] Agnes Nagy, Hector Trujillo, “**3D magnetic-field sensor using only a pair of terminals.**”Sensors and ActuatorsA,58(1997)137-140.

[3] R.S. Popovic, “**The Vertical Hall-Effect Device.**” IEEE Electron Devices Lett, vol. EDL-5,pp,357-358.1984.

[4] Henry p. Baltes, “**Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor**”, IEEE Trans. Electron Device, vol.74, pp.315-317, no8, 1986.

[5] T. Nakamura and K. Maenaka, “**Integrated Magnetic Sensor**”, Sensors and Actuators, vol.35, pp.21-23, 1990.

[6] H.P. Baltes, R.S. Popovic, “**Integrated semiconductor magnetic field sensors**”, Proc, IEEE 74 (8) (1986) 1107-1132.

[7] H. Pfleiderer, “**Magnetodiode model**”, Solid-State Electron., vol.15 p. 335, 1972.

[8] O.S. Lutes, P.S. Nussbaum, and O.S. Aadland, “**Sensitivity limist in SOS magnetodiodes**”, IEEE Trans, Electron Devices, vol. Ed-27, p.68, 1979.

[9] A. Mohaghaegh, S. Crjistoloveanu, ahd J. De Poncharra, “**Double-injection phenomena under magnetic field in SOS films: A new generati9on of magnetosensitive microdevices**”, IEEE Trans. Electron Devices., vol. ED-28. p. 237,1981.

[10] รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช, “**Semiconductor Device**” แผนกตาราคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกลาเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542

[11] รศ.ดร. เติมพงษ์ เพ็ชรกูล, “**อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ**”, แผนกตาราคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[12] Hong Xiao, “**Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology**”, Pearson Prentice Hall, 2001.

[13] Julian W. Gardner, “**Microsensors Principles and Application**”, John Wiled & Sons, Chichester, 1994, Ch. 8, pp. 199-220.

[14] H. P. Baltes and R. S. Popovic, “**Integrated semiconductor magnetic field sensors**”, IEEE Trans. Electron Devices, vol. 74, p.1107, 1986.

[15] H. Trujillo, A. Nagy and J.C. Cruz, “**Influence of topologyon the response of lateral magnetotransistor**”, Sensors and Actuators A, 45 (1994) 179-182.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[16] H. Trujillo, A. Nagy, P. Rodrigues and F. Rodrigues, "**Merged lateral bipolar magnetotransistor**", Sensors and Actuators A, 50 (1995) 177-181.

[17] L. Ristic, T. Smy and Henry P. Baltes, "**A Lateral Magnetotransistor Structure with a Linear Response to the Magnetic field**", IEEE Trans. Electron Devices, vol.36, NO 6, 1989.

[18] ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์, โสภณ พรหมชัย, เติมพงษ์ เพ็ชรกูล, "**ไบโพล่าร์ทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวดิ่ง**", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26, เดือน พฤศจิกายน ปี 2546, หน้า 1419-1424

[19] Toempong Phetchakul, Weera Pengchan, Chana Leepattarapongpan, "**Three Terminals Magnetotransistor Sensing by Difference of Base and Collector Current**", International Conference on Materials for Advance Technologies, Singapore, July 3-8, 2005.

[21] ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์, วีระเพ็งจันทร์, เติมพงษ์ เพ็ชรกูล, "**แมกนีโตทรานซิสเตอร์โหมดการทำงานสามขั้ว**", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 27, เดือนพฤศจิกายน ปี 2547, หน้า 273-276

[22] ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์, วีระ เพ็งจันทร์, เติมพงษ์ เพ็ชรกูล, "**ไบโพล่าร์ทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์**", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28, เดือน ตุลาคม ปี 2548, หน้า 1225-1228

[23] "**Sentaurus Process Used Guide**" Sysnopsis, Version A-2007.12, December 2007

[24] "**Sentaurus Device Used Guide**" Sysnopsis, Version A-2007.12, December 2007

[25] "**Sentaurus Structure Editor Used Guide**" Sysnopsis, Version A-2007.12, December 2007

[26] ปัญญากร โสตทิพย์, เติมพงษ์ เพ็ชรกูล, ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์ และคณะ, "**ผลของระยะเบี่ยงเบนและความกว้างการฉีดพาหะต่อความไวของแมกนีโตทรานซิสเตอร์**", NECTEC-ACE2010 Special Edition, September 2010, pp.212-217

[27] T. Phetchakul, S. Muangthong, C. Leepattarapongpang, A. Poyai "**A Simulation of 3-Axis Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination–Deflection Effect**", International Conference on ElectricalEngineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2014 11th, Nakhon Ratchasima, May 14-17

[28] สมุจเฉท ม่วงทอง, เติมพงษ์ เพ็ชรกูล, ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์ และ อัมพร โพธิ์ใย "**กลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแส**" ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36 (EECON-34) 11 -13 ธันวาคม 2556 Volume 2 หน้า 661-664

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

คุณสมบัติทั่วไปของซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์

1. คุณสมบัติทั่วไปของซิลิคอน

Properties of Si at 300 K

Properties	Si
Atoms/cm^3	5.0×10^{22}
Atomic weight	28.09
Breakdown field, V/cm	$\sim3\times10^{5}$
Crystal Structure	Diamond
Density, g/cm^3	2.328
Distance between neighboring atoms, nm	0.2328
Effective density of states	
Valence band, cm^3	1.04×10^{19}
Conduction band, cm^{-3}	2.8×10^{19}
Effective mass, m^*/mo	
Electron	m^*_l=0.98
	m^*_t=0.19
Holes	m^*_{lh}=0.16
	m^*_{hh}=0.49
Electron affinity, V	4.05
Energy gap, eV	1.12
Index of refraction	3.42
Intrinsic carrier concentration, cm^{-3}	1.45×10^{10}
Intrinsic Debye length, μm	24
Intrinsic resistivity, W-cm	2.3×10^{5}
Lattice constant, nm	0.5431
Linear coefficient of thermal expansion, cm/(cm-K)	2.6×10^{-6}
Melting point, °C	1415
Minority-carrier lifetime, s	2.5×10^{-3}
Mobility, cm$^{2/}$(V.s)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2. คุณสมบัติทั่วไปของซิลิคอนไดออกไซด์

Properties of SiO_2 at300K

Properties	SiO_2
Density, g/cm^3	2.2
DC resistivity, µm.cm	10^{14}-10^{16}
Dielectric strengh, V/cm	$\sim10^{7}$
Energy gap, eV	9
Infamed absorption band, µm	9.3
Melting point, °C	~1600
Refraction index	1.46
Relative permittivity (dielectric constant)	3.9
Structure	Amorphous
Thermal expansion coefficient, K^{-1}	5×10^{-7}
Thermal conductivity, W/(cm.K)	0.014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

โปรแกรมจำลองแบบ Sentaurus TCAD

ในจำลองแบบโครงสร้างและการทำงานของแมกนีทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน มีโครงสร้างที่ใช้ในการออกแบบอยู่ 2 โครงสร้างคือ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน โดยแต่ละโครงสร้างจะมีส่วนประกอบซึ่งใช้ในการจำลองแบบอยู่ 2 ส่วน ได้แก่ 1. การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์(Sentaurus Structure Editor) 2. การจำลองคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ(Sentaurus Device)

1. การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ (Sentaurus Structure Editor)

1.1 การออกแบบโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

```
(sde:open-model "n@previous@_msh.sat")

(define MeshFactor 1.0)

;=========================Utilitie sfunctions===========================
(define wy-refine-profile-in-material (lambda (mat dx dy dz) (begin
  (sdedr:define-refinement-size
    (string-append "RSize.Profile."  mat)
    1000   1000  1000
    dx     dy    dz)
  (sdedr:define-refinement-material
    (string-append "RP.Profile." mat)
    (string-append "RSize.Profile."  mat)
    mat)
  (sdedr:define-refinement-function
    (string-append "RSize.Profile."  mat)
    "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
)))

(define wy-define-refinement-size (lambda (name maxx maxy minx miny) (begin
  (sdedr:define-refinement-size
    name (* maxx MeshFactor) (* maxy MeshFactor) (* minx MeshFactor) (* miny
MeshFactor))
)))
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
; ==================== Refinements  ==========================
(wy-refine-profile-in-material "Silicon" 0.25 0.25 0.25)

;-----------------------------------------------------------------------
; Refinement Boxes
;-----------------------------------------------------------------------

(sdedr:define-refinement-window "RW.Emitter"
  "Cuboid"  (position  5.5 5.5 78.5) (position 6.5 6.5 80.1) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.Emitter"
  3.0  3.0 3.0
  0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-placement "RP.Emitter" "RS.Emitter" "RW.Emitter" )

;-----------------------------------------------------------------------

(sdedr:define-refinement-window "RW.BaseSRB"
  "Cuboid"  (position  20.5 5.5 78.5) (position 21.5 6.5 80.1) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.BaseSRB"
   3.0  3.0 3.0
  0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-placement "RP.BaseSRB" "RS.BaseSRB" "RW.BaseSRB" )

;-----------------------------------------------------------------------

; ==================== Contacts  ==========================
;-- back collector contact:
(sdegeo:define-contact-set "Collector B"    4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Collector B")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position @<back+22.5>@
@<back+36.0>@ 80.1)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position @<back+22.5>@ @<back+36.0>@ 80.1)))

;-- front collector contact:
(sdegeo:define-contact-set "Collector F"    4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Collector F")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position @<back+22.5>@
@<back+2.0>@ 80.1)))
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position @<back+22.5>@ @<back+2.0>@ 80.1)))

;-- emitter contact:
(sdegeo:define-contact-set "Emitter"    4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Emitter")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position @<back+1.7>@
@<back+17.0>@ 80.1)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position @<back+1.7>@ @<back+17.0>@ 80.1)))

;-- substrate contact:
(define dfbool (sdegeo:get-default-boolean))
(sdegeo:set-default-boolean "ABA")
(sdegeo:create-cuboid (position -85.0 -85.0 -85.0)
 (position 85.0 85.0 @<80.0-Thick>@) "Metal" "SubstrateCut")
(sdegeo:define-contact-set "substrate"    4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "substrate")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position 1.0 1.0 0.1)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position 1.0 1.0 0.1)))
(sdegeo:set-default-boolean dfbool)

;=============================Save structure =======================
; Save BND file
(sdeio:save-tdr-bnd (get-body-list) "@tdrboundary/o@")

; Save CMD file
(sdedr:write-cmd-file "@commands/o@")

; Build Mesh
(system:command "snmesh n@node@_msh")
```

1.2 การออกแบบโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

```
(sde:open-model "n@previous@.sat")

(define MeshFactor 1.0)

;============================Utilities functions=====================
(define wy-refine-profile-in-material (lambda (mat dx dy dz) (begin
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  (sdedr:define-refinement-size
    (string-append "RSize.Profile."  mat)
    1000   1000  1000
    dx     dy    dz)
  (sdedr:define-refinement-material
    (string-append "RP.Profile." mat)
    (string-append "RSize.Profile."  mat)
    mat)
  (sdedr:define-refinement-function
    (string-append "RSize.Profile."  mat)
    "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
)))

(define wy-define-refinement-size (lambda (name maxx maxy minx miny) (begin
  (sdedr:define-refinement-size
    name (* maxx MeshFactor) (* maxy MeshFactor) (* minx MeshFactor) (* miny
MeshFactor))
)))

; =================== Refinements  ========================
(wy-refine-profile-in-material "Silicon" 0.25 0.25 0.25)

;----------------------------------------------------------------------
; Refinement Boxes
;----------------------------------------------------------------------

(sdedr:define-refinement-window "RW.Emitter"
  "Cuboid"  (position  17.0 18.0 78.5) (position 23.1 24.0 80.1) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.Emitter"
  3.0  3.0 3.0
  0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-placement "RP.Emitter" "RS.Emitter" "RW.Emitter" )

;----------------------------------------------------------------------

(sdedr:define-refinement-window "RW.BaseSRB1"
  "Cuboid"  (position  39.0 12.2 78.5) (position 40.0 29.8 80.1) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.BaseSRB1"
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  3.0  3.0 3.0
 0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-placement "RP.BaseSRB1" "RS.BaseSRB1" "RW.BaseSRB1" )

;----------------------------------------------------------------------

(sdedr:define-refinement-window "RW.BaseSRB2"
 "Cuboid"  (position  11.1 39.8 78.5) (position 29.0 40.8 80.1) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.BaseSRB2"
  3.0  3.0 3.0
 0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-placement "RP.BaseSRB2" "RS.BaseSRB2" "RW.BaseSRB2" )

;----------------------------------------------------------------------

(sdedr:define-refinement-window "RW.BaseSRB3"
 "Cuboid"  (position  0.1 12.2 78.5) (position 1.1 29.8 80.1) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.BaseSRB3"
  3.0  3.0 3.0
 0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-placement "RP.BaseSRB3" "RS.BaseSRB3" "RW.BaseSRB3" )

;----------------------------------------------------------------------

(sdedr:define-refinement-window "RW.BaseSRB4"
 "Cuboid"  (position  11.1 1.2 78.5) (position 29.0 2.2 80.1) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.BaseSRB4"
  3.0  3.0 3.0
 0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-placement "RP.BaseSRB4" "RS.BaseSRB4" "RW.BaseSRB4" )

;----------------------------------------------------------------------

; =================== Contacts  =========================
;-- base1 contact:
(sdegeo:define-contact-set "Base1"    4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Base1")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position @<back+49.5>@
@<back+32.0>@ 80.1)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position @<back+49.5>@ @<back+32.0>@ 80.1)))

;-- collector1 contact:
(sdegeo:define-contact-set "Collector1"    4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Collector1")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position @<back+49.5>@
@<back+20.0>@ 80.1)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position @<back+49.5>@ @<back+20.0>@ 80.1)))

;-- base2 contact:
(sdegeo:define-contact-set "Base2"    4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Base2")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position @<back+19.0>@
@<back+50.3>@ 80.1)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position @<back+19.0>@ @<back+50.3>@ 80.1)))

;-- collector2 contact:
(sdegeo:define-contact-set "Collector2"    4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Collector2")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position @<back+31.0>@
@<back+50.3>@ 80.1)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position @<back+31.0>@ @<back+50.3>@ 80.1)))

;-- base3 contact:
(sdegeo:define-contact-set "Base3"    4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Base3")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position @<back+0.6>@
@<back+20.0>@ 80.1)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position @<back+0.6>@ @<back+20.0>@ 80.1)))

;-- collector3 contact:
(sdegeo:define-contact-set "Collector3"    4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Collector3")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position @<back+0.6>@
@<back+32.0>@ 80.1)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position @<back+0.6>@ @<back+32.0>@ 80.1)))
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;-- base4 contact:
(sdegeo:define-contact-set "Base4"    4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Base4")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position @<back+31.0>@
@<back+1.8>@ 80.1)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position @<back+31.0>@ @<back+1.8>@ 80.1)))

;-- collector4 contact:
(sdegeo:define-contact-set "Collector4"    4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Collector4")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position @<back+19.0>@
@<back+1.8>@ 80.1)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position @<back+19.0>@ @<back+1.8>@ 80.1)))

;-- emitter contact:
(sdegeo:define-contact-set "Emitter"    4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Emitter")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position @<back+25.0>@
@<back+25.0>@ 80.1)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position @<back+25.0>@ @<back+25.0>@ 80.1)))

;-- substrate contact:
(define dfbool (sdegeo:get-default-boolean))
(sdegeo:set-default-boolean "ABA")
(sdegeo:create-cuboid (position -85.0 -85.0 -85.0)
 (position 85.0 85.0 @<80.0-Thick>@) "Metal" "SubstrateCut")
(sdegeo:define-contact-set "substrate"    4.0  (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "substrate")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position 1.0 1.0 0.1)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position 1.0 1.0 0.1)))
(sdegeo:set-default-boolean dfbool)

;===============================Savestructure========================
; Save BND file
(sdeio:save-tdr-bnd (get-body-list) "@tdrboundary/o@")

; Save CMD file
(sdedr:write-cmd-file "@commands/o@")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
; Build Mesh
(system:command "snmesh n@node@_msh")
```

2. การจำลองคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ

การจำลองคุณสมบัติทางฟิสิกส์เป็นการจำลองการทำงานปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของอุปกรณ์ และความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็ก ซึ่งในส่วนนี้สามารถจำลองการทำงานได้ด้วย Sentaurus Device (sdevice) และคำสั่งที่ใช้ในการจำลองการทำงานแสดงได้ดังนี้

```
#if @IcVc@ == 0
#noexec
#endif
!(
if { "@Type@" == "pnp" } {
 set Sign  1.0
 set HFS1   "hHighFieldSaturation"
 set HFS2   "eHighFieldSaturation"
 set HYDRO  "Hydrodynamic"
 set IMPACT "hAvalanche(Okuto) eAvalanche(Okuto)"
 set EQNS   "Poisson Electron Hole"

} else {
 set Sign -1.0
 set HFS1   "eHighFieldSaturation"
 set HFS2   "hHighFieldSaturation"
 set HYDRO  "Hydrodynamic"
 set IMPACT "eAvalanche(Okuto) hAvalanche(Okuto)"
 set EQNS   "Poisson Electron Hole"

}
)!

Electrode {
   { Name="Emitter"   Voltage=0.0 }
   { Name="Collector" Voltage=0.0 }
   { Name="Base" Voltage=0.0 }
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
File {
  * Input Files
  Grid       = "@tdr@"
  Parameter  = "@parameter@"
  * Output Files
  Current    = "@plot@"
  Plot       = "@tdrdat@"
  Output     = "@log@"
}

Physics {
    EffectiveIntrinsicDensity( Slotboom )
  Mobility (
    DopingDep(Masetti)
   !(puts $HFS1)!
   !(puts $HFS2)!
  )
  Recombination (
   Auger
    SRH(DopingDep)
  )
  MagneticField = ( @BFieldX@, @BFieldY@, @BFieldZ@ )
}

Physics (MaterialInterface="Oxide/Silicon") {
  Recombination(surfaceSRH)
}

#Physics (region = "region_1") {
#   Polarization (Memory=5)
#}

Plot {
  eDensity hDensity
  eCurrent/Vector hCurrent/Vector
  Current/Vector
  ElectricField
  eQuasiFermi hQuasiFermi
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
   egradQuasiFermi hgradQuasiFermi
   Potential Doping SpaceCharge
   SRH Auger
   eMobility hMobility
   DonorConcentration AcceptorConcentration
   Doping
   eVelocity hVelocity
   ConductionBandEnergy ValanceBandEnergy BandGap
   eQuasiFermi hQuasiFermi
   SurfaceRecombination
   Polarization/Vector
}

Math {
   Iterations = 25
   Notdamped = 100
   RelErrControl
   ErRef(Electron)=1.e10
   ErRef(Hole)=1.e10
}

Solve {
   * Initial Guess
#  Coupled (LineSearchDamping=0.01) { Poisson }
   Coupled ( Iterations=25 ) { Poisson }
   Coupled { Poisson Electron Hole }

   * Initial base ramp
   Quasistationary (
      InitialStep=1e-3 Minstep=1e-5 MaxStep=0.3
      Goal { Name="Emitter" Voltage=!(puts [expr $Sign*@Vinit@])!}
   ){ Coupled { !(puts $EQNS)! } }

   * Change base to current mode
   Set ( "Emitter" mode Current )

*- Ramp base to Ibmin
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    NewCurrentFile= "IcVcE_v2_newd_01"
    Quasistationary (
    InitialStep=1e-6 Increment=1.5
      Minstep=1e-8 MaxStep=0.3
     Goal { Name="Emitter" Current=!(puts [expr $Sign*@Ibmin@])! }
   ){ Coupled { !(puts $EQNS)! }
       CurrentPlot ( Time = (Range = (0.0 0.2) Intervals=10;
                             Range = (0.2 1.0) Intervals=20))
    }

}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. สมุจเฉท ม่วงทอง, เติมพงษ์ เพ็ชรกูล, ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์ และ อัมพร โพธิ์ใย “กลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแส” ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 36 (EECON-34) 11 -13 ธันวาคม 2556 Volume 2 pp.661-664
2. T. Phetchakul, S. Muangthong, C. Leepattarapongpang, A. Poyai “A Simulation of 3-Axis Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination – Deflection Effect”, International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2014 11th, Nakhon Ratchasima, May 14-17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36

The 36th Electrical Engineering Conference (EECON 36)

11-13 ธันวาคม 2556

ณ เฟลิกซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ท จ.กาญจนบุรี

72 ปี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Volume 2

(CM) ไฟฟ้าสื่อสาร
(EL) อิเล็กทรอนิกส์
(PH) โฟโตนิกส์
(CT) ระบบควบคุมและการวัดคุม
(DS) การประมวลสัญญาณดิจิตอล
(CP) คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
(GN) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า
(BE) วิศวกรรมชีวการแพทย์

Electrical Engineering Dept.
Faculty of Engineering
Kasetsart University
50 Ngamwongwan Road Latyao
Chatuchak Bangkok 10900
Tel: 02-797-0999 ext 1503, 1504
Fax: 02-579-7566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแส

Mechanism of Merged Magnetotransistor

สมุจเฉท ม่วงทอง[1], เติมพงษ์ เพ็ชรกูล[1], ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์[2]และอัมพร โพธิ์ใย[2]
[1] สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. 0-2329-8344-5 E-mail: zerocustomer@hotmail.com
[2] ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
51/4 หมู่ที่ 1 วังตะเคียน อำเภอเมือง ฉะเชิงเทรา 24000 โทร. 038-857-100 ถึง 9

บทคัดย่อ

ในบทความนี้นำเสนอกลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแส ผ่านการจำลองการทำงานของตัวอุปกรณ์ โดยใช้โปรแกรม TCAD Sentaurus อุปกรณ์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้ง 3 แกน (X, Y, Z) การตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์อาศัยผลของการเบี่ยงเบนพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ โครงสร้างของอุปกรณ์ประกอบไปด้วยอิมิตเตอร์ 1 ตัว เบส 4 ตัวถูกต่อร่วมกัน และคอลเลคเตอร์ 4 ตัวถูกต่อร่วมกัน

คำสำคัญ: แมกนีโตทรานซิสเตอร์, 3 แกน, การเบี่ยงเบนพาหะ, TCAD Sentaurus

Abstract

This paper presents the mechanism of merged magnetotransistor. The device can detect magnetic field in all three vector directions (B_X, B_Y and B_Z). The magnetic field response is studied by simulation with TCAD Sentaurus program. The mechanism relies on carrier deflection to make a difference of current between base and collector (ΔI_{CB}). The device is composed of one emitter, four bases and four collectors. All collectors and bases were connected in one terminal of collector and base.

Keywords: magnetotransistor, 3-axis, carrier deflection, TCAD Sentaurus

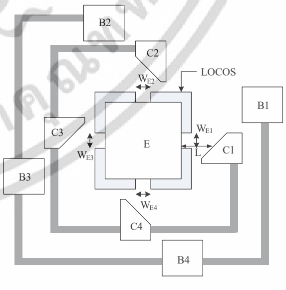
1. บทนำ

โดยทั่วไปการวัดสนามแม่เหล็ก 3 ทิศทางจำเป็นต้องใช้เซนเซอร์แม่เหล็กหลายตัวซึ่งแต่ละตัวสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้เพียง 1 ทิศทาง โดยการจัดวางให้เซนเซอร์มีทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กทำให้เกิดความยุ่งยากในการใช้งาน แต่แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสที่นำเสนอสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้ 3 ทิศทาง (X, Y, Z) โดยใช้เซนเซอร์เพียง 1 ตัว และมีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่สูง เพราะเป็นโครงสร้างแบบรวมกระแส ซึ่งแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสทั่วไปไม่สามารถวัดสนามแม่เหล็กใน 3 ทิศทางได้ แต่แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่นำเสนอในบทความนี้สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยใช้ผลของการเบี่ยงเบนพาหะเนื่องมาจากแรงลอเรนซ์ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB})[1-4]

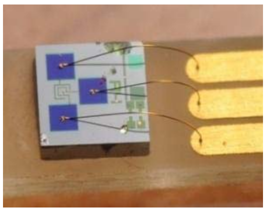
จากบทความก่อนหน้านี้[2]ได้อธิบายถึงการศึกษาเบื้องต้นและคุณสมบัติต่างๆ ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสอาทิเช่น เป็นโครงสร้างที่มีการพัฒนาขึ้นมาจากโครงสร้างเดิมที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้เพียง 1 หรือ 2 ทิศทางโดยอาศัยเทคโนโลยีการสร้างซีมอส ตัวอุปกรณ์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ 3 ทิศทาง (B_X, B_Y, B_Z) ในบทความนี้จะอธิบายถึงกลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแส (Merged Magnetotransistor) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแกนต่าง ๆ (B_x, B_y, B_z) และอธิบายถึงการเคลื่อนที่ของพาหะในสนามแม่เหล็กทิศทางต่างๆ โดยใช้วิธีการจำลองแบบโดยโปรแกรม TCAD Sentuarus [5]

2. โครงสร้างและหลักการทำงาน

2.1 โครงสร้างของอุปกรณ์



(ก)



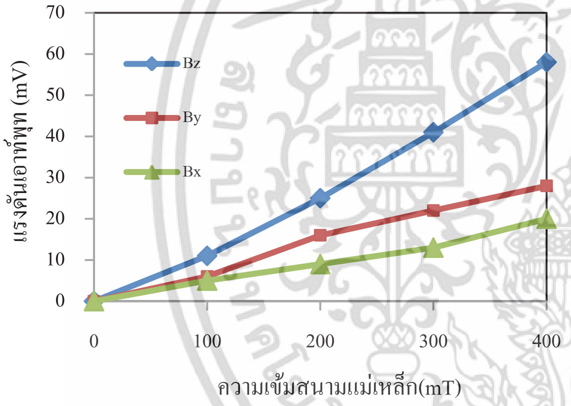
(ข)

รูปที่ 1 โครงสร้างของอุปกรณ์ (ก) มุมมองด้านบนและ (ข) หลังจากสร้างเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสแสดงดังรูปที่ 1 เป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพี-เอ็น-พี อิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ถูกโด๊ปด้วยอะตอมสารเจือโบรอน (ชนิดพี) และเบสถูกโด๊ปด้วยอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส (ชนิดเอ็น) อุปกรณ์ถูกสร้างขึ้นบนฐานรองชนิดเอ็น โครงสร้างของอุปกรณ์ประกอบไปด้วย อิมิตเตอร์ (E) 1 ขั้ว คอลเลคเตอร์ (C) 4 ขั้ว และเบส (B) 4 ขั้ว เบสแต่ละขั้วถูกต่อรวมกันเป็น 1 ขั้วและคอลเลคเตอร์ทำการต่อร่วมเช่นเดียวกัน ชั้นออกไซด์หนา (LOCOS oxide) ถูกสร้างขึ้นล้อมรอบอิมิตเตอร์โดยมีความกว้างของอิมิตเตอร์ (W_E) 5 ไมโครเมตร ระยะระหว่างอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ออกแบบให้มีขนาด 20 ไมโครเมตร คอลเลคเตอร์แต่ละขั้วถูกออกแบบให้ด้านหนึ่งมีความเอียง 45 องศา แสดงได้ดังรูปที่ 1(ก) และในรูปที่ 1(ข) แสดงรูปแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบรวมกระแสที่ทำการสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว

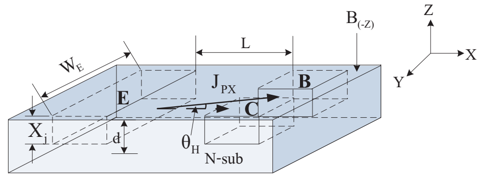
รูปที่ 2 แสดงผลการวัดสนามแม่เหล็กใน 3 ทิศทาง(x, y, z) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสที่สร้างขึ้น โดยใช้กระแสไบอัสอิมิตเตอร์ 0.2 mA และวัดสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-400 mT



รูปที่ 2 กราฟผลการวัดสนามแม่เหล็ก 3 ทิศทาง(x, y, z) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสที่สร้างขึ้น[2]

2.2 หลักการทำงานเบื้องต้น

แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในแนวดิ่งและแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยโครงสร้างการทำงานเบื้องต้นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ประกอบไปด้วยอิมิตเตอร์ เบสและคอลเลคเตอร์ การทำงานเบื้องต้นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ใช้หลักการเบี่ยงเบนของพาหะ (โฮล) เนื่องมาจากแรงลอเรนซ์ขณะที่มีสนามแม่เหล็กผ่านตัวอุปกรณ์ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_{CB}) การตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทางแนวดิ่ง ($B_{(-Z)}$) ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง –y การเบี่ยงเบนเกิดขึ้นที่ขั้วเบสและคอลเลคเตอร์ โดยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์คือ ΔI_{CB}, กระแสพาหะโฮล คือ J_{px}, ความกว้างของอิมิตเตอร์คือ W_E, ความลึกของรอยต่อคือ X_j, ระยะการเบี่ยงเบนคือ L และมุมเบี่ยงเบนคือ θ_H โดยสนามแม่เหล็ก ($B_{(-Z)}$) มีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางกระแส



รูปที่ 3 การเบี่ยงเบนของพาหะ (โฮล)

ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กผ่านตัวอุปกรณ์กระแสอิมิตเตอร์คือผลรวมของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ $I_E=I_C+I_B$ และเมื่อทำการปรับค่าออฟเซตให้เป็นศูนย์จากวงจรภายนอก $\Delta I_{CB}=I_C-I_B=0$ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปความหนาแน่นกระแสพาหะ (Carrier density) ได้ดังสมการที่ 1

$$I_E = J_{px} \cdot W_E \cdot d \quad (1)$$

เมื่อ J_{px} คือความหนาแน่นกระแสพาหะ, W_E คือความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะ และ d คือความลึกของกระแสที่ผิว (Effective depth of current)

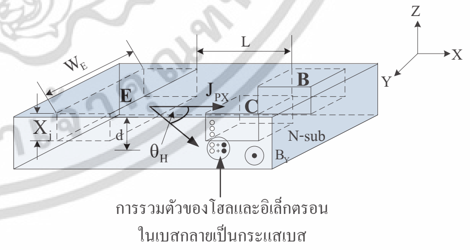
การเบี่ยงเบนของกระแสพาหะเนื่องมาจากแรงลอเรนซ์ ไปจากทิศทางเดิมเป็นมุม θ_H โดยมุมของการเบี่ยงเบนขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ค่าสภาพความคล่องของพาหะ (μ_p) และค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ซึ่งแสดงความสัมพันธ์นี้ได้ดังสมการที่ 2

$$\tan \theta_H = \mu_p \cdot B_Z \quad (2)$$

การเบี่ยงเบนของกระแสพาหะที่เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3

$$\Delta I_{CB} = J_{px} \cdot W_E \cdot L \cdot \tan \theta_H \quad (3)$$

เช่นเดียวกันในรูปที่ 4 แสดงการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวนอน (B_Y) ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์และการเบี่ยงเบนของโฮลในทิศทาง –z



รูปที่ 4 การตอบสนองของพาหะ(โฮล)ขณะมีสนามแม่เหล็กแนวนอน

ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวนอนสามารถวิเคราะห์ได้ตามสมการเดียวกับการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวดิ่ง

สมการแสดงค่าความไวของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก (Sensitivity) เขียนได้ 2 แบบ คือ 1.ค่าความไวสัมพัทธ์ (Relative sensitivity, S_R) และ 2.ค่าความไวสัมบูรณ์ (Absolute sensitivity, S_A) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

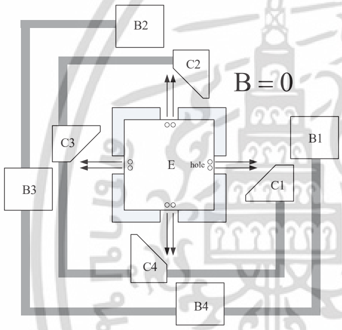
$$S_R = \frac{\Delta I_{CB}}{I_E \cdot \Delta B_Z} \quad (4)$$

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

3. กลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแส

แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสมีความสามารถในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในทิศทางแกน B_Z, B_Y และ B_X การทำงานพื้นฐานของตัวอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 5 โครงสร้างดังรูปช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กโดยการต่อรวมกันของเบส 4 ขั้วและคอลเลคเตอร์ 4 ขั้วเป็นเบส 1 ขั้วและคอลเลคเตอร์ 1 ขั้ว แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสสามารถฉีดพาหะได้ใน 4 ทิศทาง ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์จะเท่ากัน ($\Delta I_{CB}= 0$) และสามารถแสดงผลต่างของกระแสได้ดังนี้

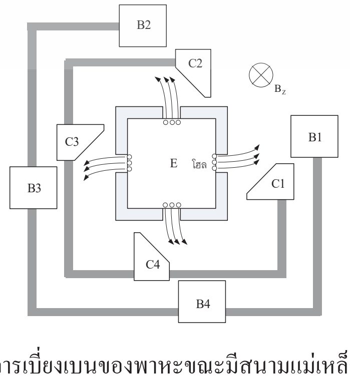
$$\Delta I_{CB(total)} = (I_{C1} + I_{C2} + I_{C3} + I_{C4}) - (I_{B1} + I_{B2} + I_{B3} + I_{B4}) \quad (6)$$



รูปที่ 5 การฉีดพาหะขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก (B=0)

3.1 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวดิ่ง : B_Z

ในรูปที่ 6 แสดงการตรวจจับสนามแม่เหล็กของทิศทางแนวดิ่ง B(-z) และการเบี่ยงเบนพาหะใน 4 ทิศทาง ผลของการเบี่ยงเบนพาหะทำให้กระแสเบสเพิ่มขึ้นและกระแสคอลเลคเตอร์ลดลง ($\Delta I_{CB} \neq 0$) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเบสและคอลเลคเตอร์แต่ละคู่มีค่าเหมือนกันจากการออกแบบให้คอลเลคเตอร์มีมุม 45° ทำให้เพิ่มโอกาสเกิดการรวมตัวของพาหะมากขึ้น ด้วยเหตุนี้กระแสเบสจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย



รูปที่ 6 ทิศทางการเบี่ยงเบนของพาหะขณะมีสนามแม่เหล็กแนวดิ่งแกน z

สมการที่ 7 แสดงผลรวมของ ΔI_{CB} จากขั้วเบสและคอลเลคเตอร์ทั้ง 4 คู่ และในสมการที่ 8 แสดงค่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น4 เท่า

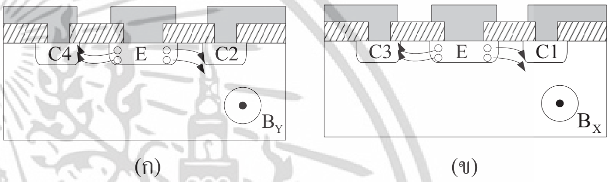
$$\Delta I_{CB(-Z)} = (\Delta I_{C1} + \Delta I_{C2} + \Delta I_{C3} + \Delta I_{C4}) - (\Delta I_{B1} + \Delta I_{B2} + \Delta I_{B3} + \Delta I_{B4}) \quad (7)$$

$$S_R = \frac{4 \cdot \Delta I_{CB}}{I_E \cdot \Delta B_Z} \quad (8)$$

3.2 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวนอน : B_Y, B_X

การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอน B_Y ทำให้มีแรงลอเรนซ์กระทำในทิศทางแกน z การเบี่ยงเบนของพาหะเกิดขึ้นที่ขั้ว B(2)–C(2) ในทิศทาง -z และขั้ว B(4)–C(4) ในทิศทาง z ในรูปที่ 7(ก) แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะและในสมการที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทาง B_Y

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



รูปที่ 7 ทิศทางการเบี่ยงเบนของพาหะขณะมีสนามแม่เหล็กแนวนอน (ก) B_Y และ(ข) B_X

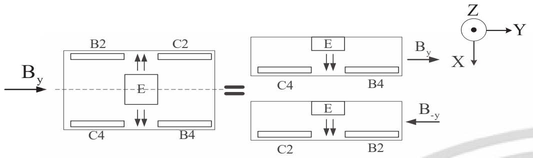
การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอน B_X ทำให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนขึ้นที่ขั้ว B(1)-C(1) ในทิศทาง –z และที่ขั้ว B(3)-C(3) เกิดการเบี่ยงเบนในทิศทาง z ในรูปที่ 7(ข) แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะและในสมการที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ของการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทาง B_X

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

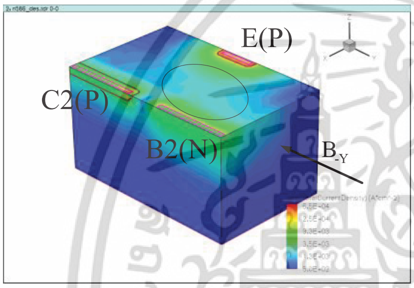
กลไกการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวนอน(B_Y) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ขั้ว B(2)-C(2) และขั้ว B(4)-C(4) พาหะโฮลที่ขั้ว B(2)-C(2) เกิดการเบี่ยงเบนในทิศทาง –z (ดังรูปที่ 7(ก)) จากการรวมตัวของโฮลและอิเล็กตรอนในฐานรองซึ่งมีชนิดเหมือนเบสทำให้เกิดเป็นกระแสเบส (I_{B2}) และเนื่องจากโครงสร้างมีความลึกรอยต่อ (Xj) ที่ตื้น ทำให้โฮลเปลี่ยนแปลงมุมเบี่ยงเบนเพียงเล็กน้อยสามารถไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ฐานรอง ส่งผลให้กระแสคอลเลคเตอร์ (I_{C2}) ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยลง ขณะที่เกิดสนามแม่เหล็กทิศทาง y พาหะที่ขั้ว B(4)-C(4) เกิดการเบี่ยงเบนในทิศทาง z ทำให้กระแสเบส (I_{B4}) มีค่าเพิ่มขึ้นและกระแสคอลเลคเตอร์ (I_{C4}) มีค่าน้อยลง แต่การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นไม่เหมือนกับขั้ว B(2)-C(2) ความแตกต่างนี้เกิดจากความไม่สมมาตร ผลของการรวมตัวใหม่และการเบี่ยงเบนพาหะของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสที่มีชนิดการโด๊ปเหมือนกันระหว่างเบสและฐานรองซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

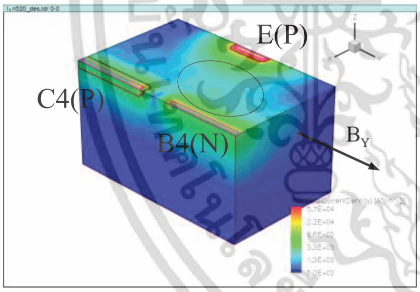
เราสามารถพิสูจน์สมมติฐานได้โดยใช้การจำลองแบบด้วยโปรแกรม TCAD Sentaurus จำลองการทำงานของขั้ว B(2)-C(2) และขั้ว B(4)-C(4) โดยกำหนดให้กระแสมีทิศทางไปตามแกน x และมีสนามแม่เหล็ก 1 เทสลาตั้งฉากกับทิศทางกระแส จากรูปที่ 8 เมื่อกำหนดให้กระแสมีทิศทาง x ที่ขั้ว B(2)-C(2) ต้องให้สนามแม่เหล็กทิศทาง -y เพื่อให้ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเหมือนกับกระแสไหลในทิศทาง -x และมีสนามแม่เหล็กทิศทาง y



รูปที่ 8 การกำหนดทิศทางกระแสและทิศทางสนามแม่เหล็กของการจำลองการทำงาน

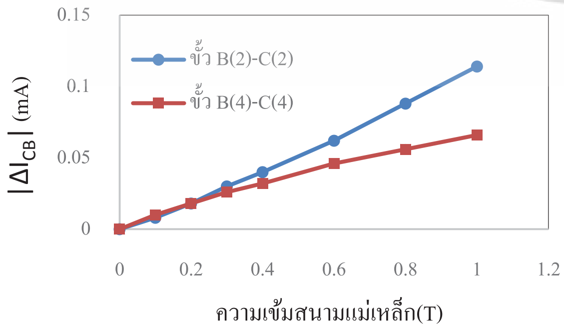


(ก)



(ข)

รูปที่ 9 ความหนาแน่นกระแสโดยการจำลอง 3 มิติของ (ก) ขั้ว B(2)-C(2) และ (ข) ขั้ว B(4)-C(4) ขณะมีสนามแม่เหล็กแนวนอน



รูปที่ 10 กราฟการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวนอน(แกน y) ของขั้ว B(2)-C(2) และขั้ว B(4)-C(4) โดยโปรแกรม TCAD

รูปที่ 9 แสดงการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง -y และ y ของขั้ว B(2)-C(2) และขั้ว B(4)-C(4) ตามลำดับ ความแตกต่างของความหนาแน่นกระแสถูกแสดงโดยสีต่างๆ และจากรูปแสดงให้เห็นว่ากระแสเบสที่เพิ่มขึ้นและกระแสคอลเลคเตอร์ที่ลดลงจากขั้ว B(4)-C(4) และขั้ว B(2)-C(2) มีค่าแตกต่างกันตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

รูปที่ 10 แสดงกราฟผลการจำลองการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้าม (ทิศทาง y และ –y) ของตัวอุปกรณ์ โดยจากรูปแสดงให้เห็นว่า $|\Delta I_{CB}|$ ที่ได้จากการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามมีค่าต่างกันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันที่ขั้ว B(2)-C(2) และขั้ว B(4)-C(4) ทำให้ผลลัพธ์ของการรวมกระแสจากสมการที่ 9 มีค่าไม่เป็นศูนย์ โดยที่กระแสไบอัส 5 mA ค่าความไวของอุปกรณ์ต่อสนามแม่เหล็กทิศทาง -y และ y มีค่า 0.1 mA/T และ 0.08 mA/T ตามลำดับ

5.สรุป

แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสมีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กสูงเนื่องจากมีการรวมกระแสการฉีดพาหะใน 4 ทิศทางและมีความสามารถในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ 3 แกน (B_X, B_Y, B_Z) เป็นผลจากความไม่สมมาตรของโครงสร้าง ซึ่งแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสทั่วไปทำไม่ได้ และอุปกรณ์มีจำนวนขาเหมือนทรานซิสเตอร์ 1 ตัว ทำให้สามารถใช้งานได้ง่าย การตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์อาศัยผลของการรวมตัวใหม่-การเบี่ยงเบนพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติในการให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] 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.

[2] สมุจเฉท ม่วงทอง, เติมพงษ์ เพ็ชรกูล, ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์, พุทธพล เพ็งพัด, นริชพันธ์ เป็นผลดี, อาคม ศรีหาเพท, ชาญเดช หรูอนันต์ และอัมพร โพธิ์ใย, "แมกนีโตทรานซิสเตอร์ 3 มิติแบบพลังงานต่ำโดยอาศัยเทคโนโลยีซีมอส", EECON-34, Vol. 2, หน้า 921-924, 2011

[3] Agnes Nagy, Hector Trujillo, "3D magnetic-field sensor using only a pair of terminals," Sensors and Actuators A58, 137-140, 1997.

[4] 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.

[5] TCAD Sentaurus Manual, Sysnopsis, Version A-2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ECTI-CON 2014

Nakhon Ratchasima, Thailand May 14-17, 2014

ECTI-CON 2014 is the eleventh annual international conference organized by Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association, Thailand. The conference aims to provide an international platform to present technological advances, launch new ideas and showcase research work in the field of electrical engineering, electronics, computer, telecommunications and information technology. Accepted papers will be published in the Proceedings of ECTI-CON 2014 and will be available via IEEE Xplore. Acceptance will be based on quality, relevance and originality.

Committee ECTI - CON 2014

Advisory Committee
Monai Krairiksh (KMITL)
Prabhas Chongstitvatana (CU)
Rangsan Wongsan (SUT)

Steering Committee
Tomoaki Sato (Hirosaki U, Japan)
Yoshihiro Matsui (TNCT, Japan)
Kou Yamada (Gunma U, Japan)
Prayoot Akkaraekthalin (KMUTNB)
Naruemon Wattanapongsakorn (KMUTT)
Tuptim Angkaew (CU)
Kosin Chamnongthai (KMUTT)

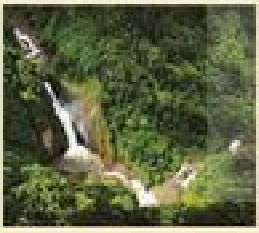
General Chairs
Prayoot Akkaraekthalin (KMUTNB)
Chutima Prommak (SUT)

General Co-Chair
Somsak Vanit-Anunchai (SUT)

General Secretary
Wipawee Hattagam (SUT)

Special session Chairs
Yoshihiro Matsui (TNCT, Japan)
Thanatchai Kulworawanichpong (SUT)

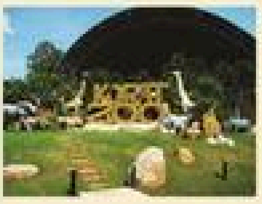
Exhibition and Sponsor Chairs
Rangsan Tongta (SUT)
Chanchai Thongsopa (SUT)
Prayoth Kumsawat (SUT)



Publicity Chairs
Kou Yamada (Gunma U, Japan)
Kongpol Areerak (SUT)
Kongpan Areerak (SUT)

TPC Chair
David Banjerdpongchai (CU)

TPC Co-chairs
Kamol Kaemarungsi (NECTEC)
Boon Hee Soong (NTU, Singapore)



International Technical Committee
Liew Soung Yue (UTAR, Malaysia)
Aduwati Sali (UPM, Malaysia)
Jiehua Chen (Seimens, China)
Tomoki Watanabe (TIT, Japan)
Kazushi Nakano (UEC, Japan)
Lin Liu (UNISA, Australia)
Hoi-Shun Antony Lui (UQ, Australia)
Konstanty Bialkowski (UQ, Australia)
Kesom Weaver (U of Southampton, UK)
Dan Juncu (Cambridge Consultants, UK)
Sarah Lee (Mango Solutions, UK)
Woon Hau Chin (Toshiba Lab, UK)
Kenedy Aliila Greyson (DIT, Tanzania)
Xiaojing Hou (CCSU, USA)
Shuju Wu (CCSU, USA)
Chatree Sangpráchathanarak (NetApp, USA)

Call for Papers:

The program of ECTI-CON 2014 will consist of regular technical sessions and special sessions. Topics of interest for submission include, but are not restricted to:

Area 1) Device, Circuits and Systems: Semiconductor Devices, Analog Circuits, Digital Circuits, Mixed Signal Circuits, Nonlinear Circuits and Systems, Sensing and Sensor Networks, Filters and Data Conversion Circuits, RF and Wireless Circuits, Photonic and Optoelectronic Circuits, Low Power Design and VLSI Physical Design, Biomedical Circuits, Assembly and Packaging Technologies, Test and Reliability, Advanced Technologies (i.e. MEMS and Nano-electronic Devices, Metamaterials), Agritronics, Embedded Systems;

Area 2) Computers: Computer Architecture, Computational Biology and Bioinformatics, Knowledge and Data Engineering, Learning Technologies, Multimedia Services and Technologies, Mobile Computing, Parallel/Distributed Computing and Grid Computing, Pattern Analysis and Machine Intelligence, Software Engineering, Visualization and Computer Graphics;

Area 3) Information Technology: IT Bio/Medical Engineering, Bioinformatics and Applications, Ontology, Business and Information Systems, Information Security and Forensics, Information Retrieval, Data Mining, Knowledge Management, Electronic Commerce, Health and Medical Informatics, Hybrid Information Technology;

Area 4) Communication Systems: Communication Theory and Information Theory, Antenna and Propagation, Microwave Theory and Techniques, Modulation, Coding, Channel Analysis, Network Design, Network Protocols, Networks Management, Optical Communications, Wireless/Mobile Communications & Technologies, Green Wireless Networks, Green Radio;

Area 5) Controls: Control Theory and Applications, Adaptive and Learning Control Systems, Fuzzy and Neural Control, Mechatronics, Manufacturing Control Systems and Applications, Process Control Systems, Robotics and Automation;

Area 6) Electrical Power Systems: Power Engineering and Power Systems, Electromagnetic Compatibility, Energy Conversion, High Voltage Engineering and Insulation, Power Delivery, Illumination, Renewable/Alternative Energy, Energy Policy and Planning;

Area 7) Power Electronics: Power devices and components, Power Quality Control, Harmonic Analysis and Compensations, Switching Circuits and Power Converters, Motors and Drives, Smart Grid, Distribution Generation and Electrical Vehicles, Photovoltaic Materials and Solar Cells;

Area8) Signal Processing: Signal Processing Theory, Digital Signal Processing Algorithms, Digital Filter Design & Implementation, Array Processing, Adaptive Signal Processing, Audio, Speech and Language Processing, Image and Video Processing, Medical Signal Processing, Medical Imaging;

Special sessions:
The aim of special sessions is to provide researchers with an opportunity to present their latest, cutting-edge research within specific fields relevant to the theme of the conference. Prospective organizers should submit proposals to the Special Session Chairs, Prof. Yoshihiro Matsui via email matsui@tokyo-ct.ac.jp or Dr. Thanatchai Kulworawanichpong via email thanatch@sut.ac.th, by September 30, 2013. (Please see details of the proposal preparation at http://www.ecticon2014.org)

Paper Submission: The review process of ECTI-CON2014 is "double-blind". Therefore, papers must be submitted without author's names and affiliations appearing in the manuscripts submitted for review. Prospective authors are invited to submit original full papers without author's names and affiliations, in English, of four to six (4-6) pages in standard IEEE two-column format only, reporting their original work and results, applications and/or implementation in one or more of the listed topics. Paper format (Doc/LaTeX) can be downloaded at http://www.ecticon2014.org.

Important dates
- Special session proposal due date: September 30, 2013
- Special session notification: October 15, 2013
- Full paper submission due date: January 6, 2014
- Notification of acceptance: March 6, 2014
- Camera-ready paper submission: April 1, 2014
- Authors and Early-bird registration: April 1, 2014

Website: http://www.ecticon2014.org,
http://www.facebook.com/EctiCon2014
Contact Address:
School of Telecommunication Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand 30000
Tel: +66 4422 4392, Fax: +66 4422 4603

ECTI Association · IEEE THAILAND SECTION · Institute of Engineering Suranaree University of Technology

...ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
...ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Simulation of 3-Axis Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination – Deflection Effect

Toempong Phetchakul, Samudchad Muangthong
Department of Electronics, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand.
kptoempo@kmitl.ac.th, zerocustomer@hotmail.com

Chana Leepattarapongpan, Amporn Poyai
Thai Microelectronics Center,
National Electronics and Computer Technology Center,
Chachoengsao, Thailand.

***Abstract*— This article presents 3 axis magnetotransistor based on the carrier recombination and deflection effect for detecting the magnetic field in B_X, B_Y and B_Z direction. The structure composes of four magnetotransistors along with x-axis and y-axis that has a common emitter while all collectors and bases are independent. The output is in the form of difference current of collector and base ΔI_{CB}. For vertical field detection, the magnetotransistor uses the carrier deflection of the deviation collector current and recombination base current as ΔI_{CB}. For lateral field detection B_X and B_Y it uses a pair of transistors that emitter biased current perpendicular to magnetic field. The output response is the difference current between collector of one and the base current of the another of a pair transistors as $\Delta I_{C(1)B(3)}$ and $\Delta I_{C(2)B(4)}$ for B_X and B_y, respectively. The sensitivity at I_E 5 mA, 0-1 T of B_X, B_Y and B_Z direction are -0.0248 mA/T, -0.0248 mA/T and 0.0092 mA/T, respectively by TCAD Sentaurus simulation.**

Keywords*— *magnetotransistor; 3-axis; carrier deflection; carrier recombination; TCAD Sentaurus

I. INTRODUCTION

The 3 axis magnetotransistor is the magnetic field device that can detect in B_X, B_Y, B_Z direction [1-6]. The principle of 3D detection has been reported in the past [1-2]. Recently, the novel magnetotransistor based on carrier recombination and deflection was proposed for several years [7] and the 3D detection has been reported later [8]. The structure for 3D detection used for magnetic transistor lied on x and y axis. The vertical field B_Z is detected by each transistor that merged together. The lateral field also used the total difference collector and base current of merged four transistors. However the explanation did not so clear that how it showed the output response. The mechanism of merged structure is on going to be published in journal soon.

In this article, the 3 axis in B_X, B_Y and B_Z magnetotransistor was studied by simulation of TCAD Sentaurus program. The structure is the same of four transistors but this time collectors and bases are separated independently. The vertical field is detected by each transistor and lateral field is detected by a pair of transistors that current is perpendicular to magnetic field. The mechanism of lateral field is discussed and the output response is the difference current between collector and base of the pair of transistors.

II. STRUCTURE AND OPERATING PRINCIPLE

A. Structure

The structure of a 3-axis magnetotransistor is shown in figure 1. This device is developed from integration of four magnetotransistors that use a common emitter but bases and collectors are separated. It consists one emitter, four collectors and four bases. Emitter and collectors are specified as p-type, base area and substrate are specified as n-type. Device has junction depth (Xj) 1 µm. The emitter width (W_E) of 5 µm is carrier injection path, the base width is 20 µm.

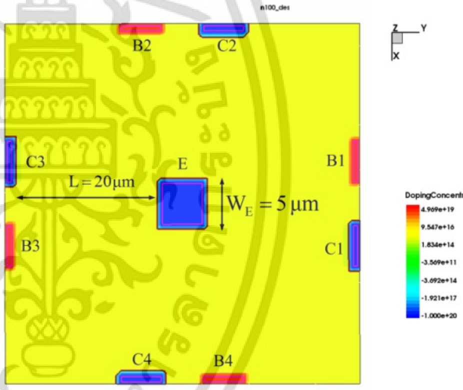


Figure 1. Structure of magnetotransistor in top view.

B. Vertical magnetic field (B_Z)

The operating principle of magnetotransistor is based on the carrier recombination - deflection due to Lorentz force while magnetic field passing through the device that causes the difference between base and collector currents (ΔI_{CB}) [7].

While magnetic field is zero, emitter is biased by constant current source, holes move from emitter to base terminal and recombination with electron in base become base current and part of hole move to collector terminal become collector current. Emitter current is summation of base and collector currents, I_E=I_C+I_B when set the offset to zero by an external circuit. Therefore ΔI_{CB}=I_C-I_B=0.

Figure 2 shows the operation principle of device when the device without magnetic field and set the offset to zero, the base and collector currents will be equal (ΔI_{CB}= 0).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

978-1-4799-2993-1/14/$31.00 ©2014 IEEE

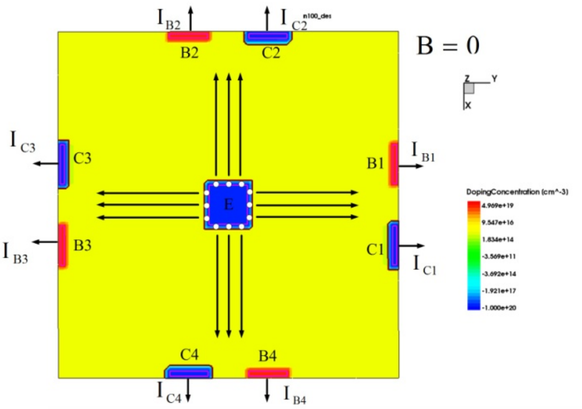


Figure 2. Current flow without magnetic field of device (B=0) in top view.

Figure 3 shows the detection of vertical magnetic field (B_Z). Device uses four magnetotransistors current perpendicular to magnetic field for detecting vertical magnetic field (B_Z), carrier deflection will occur at all base-collector pairs. The carriers (hole) are deviated in the direction of the Lorentz force collect at collector as collector current, hence collector current is higher and base current is lower ($\Delta I_{CB} \neq 0$).

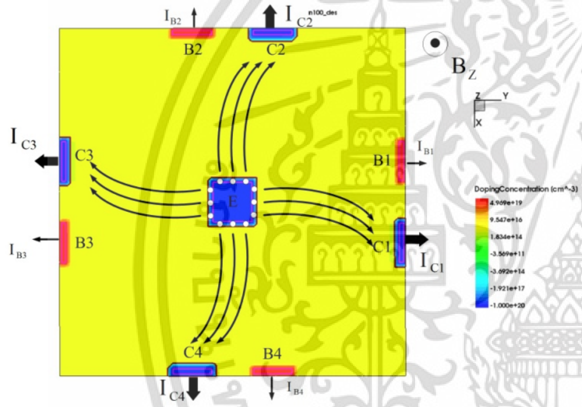


Figure 3. The direction of carrier deflection during detect vertical magnetic field B_Z in top view.

Each magnetotransistor can detect vertical magnetic field, such as fourth magnetotransistor can detect vertical magnetic field by using the difference between collector and base currents ($\Delta I_{CB(Z)} = \Delta I_{CB(4)} = I_{C(4)} - I_{B(4)}$).

The equation 1 shows the difference between collector and base currents [7] for vertical magnetic field detection in term of current density.

$$\Delta I_{CB(vertical)} = J_{px}.d.L.\mu.B_Z \quad (1)$$

where J_{px} is the current density along x-axis, μ is hole mobility, d is an effective depth of the current and B_Z is magnetic field density in z-axis.

C. *Lateral magnetic field (B_Y)*

Figure 4 shows detection of lateral magnetic field (B_Y). Device uses two magnetotransistor that current perpendicular to magnetic field for detect lateral magnetic field (B_Y). While the magnetic field is in lateral direction (B_Y), the second and fourth magnetotransistors occur carrier deflection due to Lorentz force because current perpendicular to magnetic field but the first and third magnetotransistors can not be generated carrier deflection because current parallel to magnetic field. At the second magnetotransistor, carriers (hole) are deviated into the substrate (–z-direction). Recombination of holes with electrons in substrate, which is the same type as base, to become base current (I_B) and junction depth (Xj) of device being rather shallow causes the holes change a bit angle can recombine with electron in substrate. As a result, more higher base current (I_{B2}) and more lower collector current (I_{C2}). At the fourth magnetotransistor, carriers (hole) are deviated into the collector terminal (z-direction) become collector current (I_C). This deviation can causes collector current (I_{C4}) increase slightly and base current (I_{B4}) also decrease slightly when compare with the changing current of second magnetotransistor.

So, the difference between collector and base currents of C2 and B4 terminals ($\Delta I_{CB(y)} = \Delta I_{C(2)B(4)} = I_{C(2)} - I_{B(4)}$) can be used to detect lateral magnetic field (B_Y).

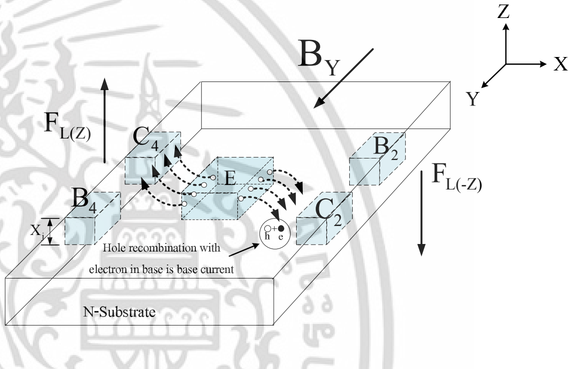


Figure 4. The direction of carrier deflection during detect lateral magnetic field B_Y.

D. *Lateral magnetic field (B_X)*

Figure 5 shows detection of lateral magnetic field (B_X). As the same in case of detection magnetic field (B_Y) but at the second and fourth magnetotransistors can not be generated carrier deflection because current parallel to magnetic field. Carrier deflection will occur only the first and third magnetotransistors because current perpendicular to magnetic field.

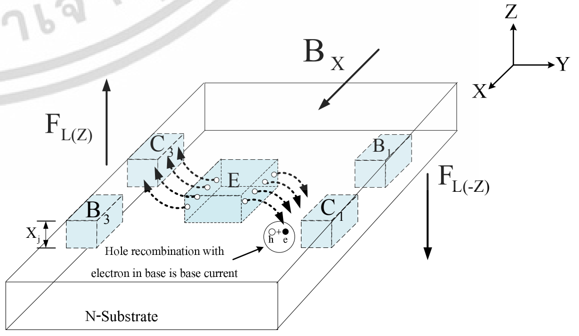


Figure 5. The direction of carrier deflection during detect lateral magnetic field B_X.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

At the first magnetotransistor occurs carrier deflection in -z-direction that more higher base current (I_{B1}) and more lower collector current (I_{C1}). At the third magnetotransistor occurs carrier deflection in z-direction that collector current (I_{C3}) increase slightly and base current (I_{B3}) decrease slightly when compare with the changing current of first magnetotransistor.

So, the difference between collector and base currents of C1 and B3 terminals ($\Delta I_{CB(x)}=\Delta I_{C(1)B(3)} = I_{C(1)}-I_{B(3)}$) can be used to detect lateral magnetic field (B_X).

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. *Experiment method*

We use TCAD Sentaurus program [9] to simulate response of magnetic field in various direction (B_X, B_Y, B_Z). First, model of device is created that has dimension as shown in figure 1. Then, parameters such as emitter width, base width, doping concentration are defined and emitter is biased by constant current source. The currents are measured at base and collector terminals as base and collector currents. Finally, magnetic field is applied to device and results of response to magnetic field from simulation are presented.

B. *Response of vertical magnetic field : B_Z*

Figure 6 shows simulation results of virtual structure of the device. The structure is generated and simulated by TCAD Sentaurus simulation program. The difference in current density will be displayed as different shading color. Normally, in case of no magnetic field as shown in 6(a) can be seen current density at B terminal more than C terminal that mean base current more than collector current. However, we will adjust the offset to zero before using. While magnetic field has been applied to the device in figure 6(b), the carriers (hole) are deviated due to Lorentz force, cause current density change when compared to the result with no magnetic field in figure 6(a) that can be observed by shading color.

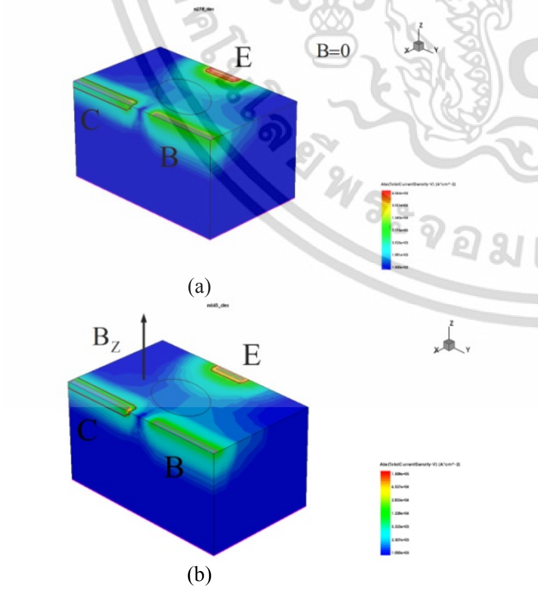


Figure 6. The current density by 3-D model (a) zero magnetic field and (b) vertical magnetic field.

Figure 7 shows the response of vertical magnetic field in z-direction of device at magnetic field density in the range of 0 to 1T. While magnetic field has been applied to device, carriers are deflected by Lorentz force to collector terminal that higher collector current and lower base current. Thus, the difference between collector and base currents is positive and sensitivity is 0.0092 mA/T.

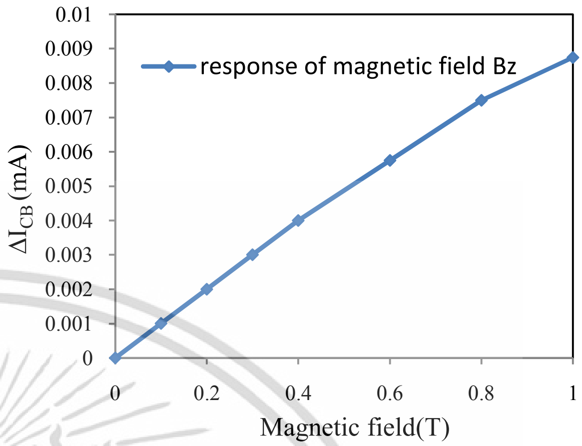


Figure 7. Response of magnetic field in z-direction at I_E=5mA

C. *Response of lateral magnetic field : B_Y*

Figure 8 shows the response of lateral magnetic field in y-direction of device at magnetic field density in the range of 0 to 1T. The response of lateral magnetic field has been explained in the section of operation principle. While magnetic field is applied to device, the effect of carrier recombination-deflection causes lower collector current (I_{C2}) and lower base current (I_{B4}) but collector current (I_{C2}) decreases more than base current (I_{B4}). Thus, the difference between collector and base currents is negative and sensitivity is -0.0248 mA/T.

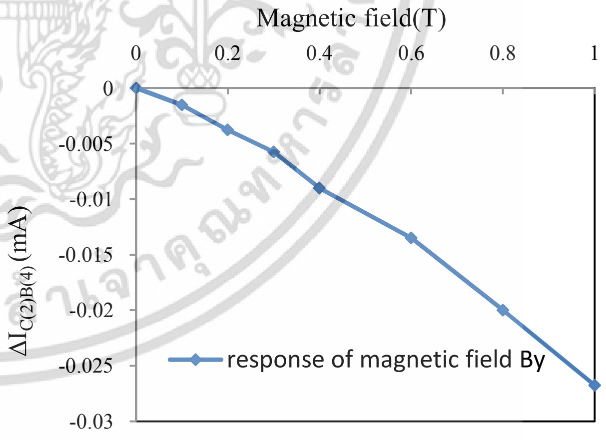


Figure 8. Response of magnetic field in y-direction at I_E=5mA.

D. *Response of lateral magnetic field : B_X*

Figure 9 shows the response of lateral magnetic field in x-direction of device at magnetic field density in the range of 0 to 1T. In this case is same the response of magnetic field (B_Y) that the effect of carrier recombination-deflection causes lower collector current (I_{C1}) and lower base current (I_{B3}) but collector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

current (I_{C1}) decreases more than base current (I_{B3}). Thus, the difference between collector and base currents is negative and sensitivity is -0.0248 mA/T.

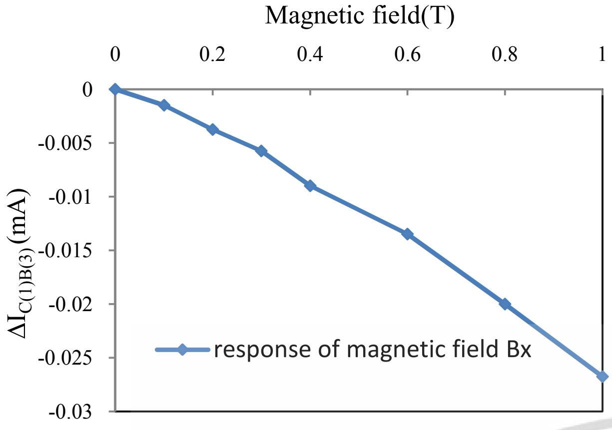


Figure 9. Response of magnetic field in x-direction at I_E=5mA.

IV. CONCLUSIONS

The 3 axis magnetotransistor base on carrier recombination –deflection effect has been presented. The structure uses four transistors that emitter is common and the rest collectors and bases are separated independently. The magnetic field B_Z is perpendicular to the surface that can detect by each four transistors in the form of current difference between collector and base by carrier recombination and deflection effect as $\triangle I_{CB}$. The lateral field B_X uses a pair of transistors 1 and 3 for detecting the field as the difference collector current I_{C1} and base current I_{B3}, $\triangle I_{C1B3}$. The lateral field B_Y carrier be detected by transistor 2 and 4 as $\triangle I_{C2B4}$.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank National Research Council of Thailand for financial supporting.

REFERENCES

[1] D. Misra, M. Zhang, Z. Cheng, “A novel 3-D magnetic-field sensor in standard CMOS technology”, *Sensors and Actuators A: Physical Volume 34, Issue 1*, 67-75, 1992.

[2] M. Paranjape, I. Filanovsky, Lj. Ristic, “A 3-D vertical hall magnetic-field sensor in CMOS technology”, *Sensors and Actuators A: Physical Volume 34, Issue 1, 9–14, 1992.*

[3] Ch. Schott, D. Manic, R.S. Popovic, “Microsystem for high-accuracy 3-D magnetic-field measurements”, *Sensors and Actuators A 67*, 133-137, 1998.

[4] Ch. Roumenin, K. Dimitrov, A. Ivanov, “Integrated vector sensor and magnetic compass using a novel 3D Hall structure”, Sensor and Actuators A 92, 119-122, 2001.

[5] S. Lozanova, Sv. Noykov, Ch. Roumenin, “A novel 3-D Hall magnetometer using subsequent measurement method”, *Sensor and Actuators A 153*, 205-211, 2009.

[6] D. Ettelt, P. Rey, G. Jourdan, A. Walther, P. Robert, and J. Delamare, “3D Magnetic Field Sensor Concept for Use in Intertial Measurement Units (IMUs)”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, *Volume:PP , Issue: 99*, 2013.

[7] 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.

[8] C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, E. Chaowicharat, C. Hruanun and A. Poyai, “The Low Power 3D-Magnetotransistor Based on CMOS Technology”, *IEEE Sensor*, pp. 500-503, 2011.

[9] TCAD Sentaurus Manual, Sysnopsis, Version A-2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสมุจเฉท ม่วงทอง
วัน เดือน ปีเกิด	10 มีนาคม พ.ศ. 2532
ที่อยู่	65 หมู่ 11 ตำบลบ้านสร้าง อำเภอบ้านสร้าง จังหวัดปราจีนบุรี 25150
ประวัติการศึกษา	2554 สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. สมุจเฉท ม่วงทอง, เติมพงษ์ เพ็ชรกูล, ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์ และ อัมพร โพธิ์ใย “กลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแส” ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 36 (EECON-34) 11 -13 ธันวาคม 2556 Volume 2 หน้า 661-664
2. T. Phetchakul, S. Muangthong, C. Leepattarapongpang, A. Poyai “A Simulation of 3-Axis Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination – Deflection Effect”, International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2014 11th, Nakhon Ratchasima, May 14-17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้