

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์  
แมกนีโตทรานซิสเตอร์หลายมิติ (2มิติ และ3 มิติ) ด้วยกลไกการเลี้ยวเบนและ  
การรวมตัวของพาหะ

Multi-Dimensions (2D-3D) Magnetotransistor by Carrier  
Deflection-Recombination

ชื่อผู้วิจัย รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน  
ประจำปี 2556  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

แมกนีโตทรานซิสเตอร์หลายมิติ (2มิติ และ3 มิติ) ด้วยกลไกการเลี้ยวเบนและ  
การรวมตัวของพาหะ

Multi-Dimensions (2D-3D) Magnetotransistor by Carrier  
Deflection-Recombination

ชื่อผู้วิจัย รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน

ประจำปี 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)...แมกนีโตทรานซิสเตอร์หลายมิติ (2มิติ และ3 มิติ) ด้วยกลไกการเลี้ยวเบน  
และการรวมตัวของพาหะ

ชื่อโครงการ(ภาษาอังกฤษ) Multi-Dimensions (2D-3D) Magnetotransistor by Carrier  
Deflection-Recombination

แหล่งเงิน .เงินงบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ..... 2556.....

ระยะเวลาทำการวิจัย..... 1..... ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2555..... ถึง..... กันยายน 2556

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัดและ อีเมล

..... รศ.ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรกุล (หัวหน้าโครงการ).....

..... สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์.....

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

คำสำคัญ (Keywords) Magnetotransistor, 2D-3D, Current mode Hall effect, Carrier  
deflection, Carrier deflection.....

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ใช้กลไกการรวมตัวและการ  
เลี้ยวเบนของพาหะมาตรวจจับสนามแม่เหล็กในสามทิศทางคือแกน X แกน Y และแกน Z  
โครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างประกอบด้วยอิมิตเตอร์หนึ่งชั้น คอลเลคเตอร์สี่ชั้นและเบสสี่ชั้น  
เอาท์พุทที่ได้คือค่าผลต่างของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ในทิศทางที่  
สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับกระแสสามารถทำงานตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งแบบแยกและ  
แบบรวมคอลเลคเตอร์และเบส จากผลการทดสอบกรณีที่นำทรานซิสเตอร์มารวมกันให้  
เป็นตัวเดียวกันที่ค่ากระแส 0.2 mA. ในทิศทางสนามแม่เหล็ก Bx, By และ Bz ในช่วง  
สนามแม่เหล็ก 0-400 mT มีค่า 2, 5 และ 14.5 %/T ซึ่งปกติแล้วแมกนีโตทรานซิสเตอร์  
ทั่วไปที่มีโครงสร้างแบบสมมาตรจะไม่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทาง Bx และ  
By ได้และจากผลการจำลองแบบในกรณีที่ทรานซิสเตอร์ทั้งสี่แยกกันสามารถที่จะตรวจจับ  
สนามแม่เหล็กทั้งสามทิศทางได้เหมือนกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั่วไป

## Abstract

This project presents the magnetic transistor that use carrier deflection and recombination to detect magnetic field in X, Y and Z direction. The device structure consisted of one emitter, 4 collectors and 4 bases. The output responses are the difference of the base and collector current. It can detect the magnetic in X, Y and Z both individual and merged transistor, collectors and bases were merged in one collector and one base. The experiment showed that, at 0.2 mA of biasing current, the BX, BY and BZ direction sensitivity to magnetic field within the range of 0 – 400 mT are 2, 5 and 14.5 %/T, respectively. This is the advantage that it can detect magnetic field in Bx and By in merged structure which the symmetry merged magnetotransistor cannot do it. In the case of separated transistor, the device can detect the magnetic field in 3 axes as normal magnetotransistor.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องก่อนหน้านี้มาโดยตลอด ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในการเอื้อเฟื้อสถานที่ห้องปฏิบัติการไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในการวิจัยต้นแบบ และศูนย์ไทยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทหลักสูตรวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ นายสมุจเฉท ม่วงนวล และนักศึกษาปริญญาเอก นายชนะ สัททพงศ์พันธ์ ในการสร้างอุปกรณ์

สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างสูงแก่ทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือเป็นกัลยามิตรไม่ว่าโดยตรงหรือโดยอ้อมก็ตาม อาทิเช่นคณะกรรมการพิจารณาให้ทุนสนับสนุน เป็นต้น และหวังว่าคงจะได้รับการสนับสนุนการวิจัยในโอกาสต่อไป



รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล  
(หัวหน้าโครงการ)

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 อุปกรณ์ฮอลล์เซ็นเซอร์ .....	5
2.1.1 หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์.....	5
2.1.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์.....	11
2.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor).....	14
2.2.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง.....	14
2.2.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง.....	16
2.2.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (Three terminal magnetotransistor).....	18
2.2.4 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน (3 axis magnetotransistor).....	19
2.3 คุณสมบัติทั่วไปของอุปกรณ์เซ็นเซอร์.....	20
2.3.1 ย่านวัด (Range).....	20
2.3.2 ความผิดพลาด (Error).....	20
2.3.3 ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision).....	20
2.3.4 ความไว (Sensitivity).....	21
2.3.5 ความเป็นเชิงเส้น (Linearity).....	21
2.3.6 ความมีเสถียรภาพ (Stability).....	21
2.3.7 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis).....	21

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.8 การแยกขีด (Resolution or Discrimination).....	22
2.3.9 ออฟเซต (Offset).....	22
2.3.10 ความเร็วในการตอบสนอง (Speed of Response).....	22
บทที่ 3 โปรแกรม Sentaurus TCAD และการจำลองแบบ.....	23
3.1 บทนำ TCAD .....	23
3.1.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง (process simulation).....	23
3.1.2 การจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (device simulation).....	24
3.2 โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD.....	25
3.2.1 Sentaurus Workbench (SWB).....	26
3.2.2 Sentaurus Process (sprocess).....	27
3.2.3 Sentaurus Structure Editor .....	27
3.2.3.1 Ligament.....	27
3.2.4 Sentaurus Device (sdevice).....	30
3.2.4.1 File.....	31
3.2.4.2 Electrode.....	32
3.2.4.3 Physics.....	32
3.2.4.4 Plot.....	33
3.2.4.5 Solve.....	33
3.2.5 Tecplot SV.....	34
3.2.6 Inspect.....	35
3.3 การจำลองแบบแมกนีโททรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนโดย TCAD.....	36
3.3.1 การออกแบบ layout ของอุปกรณ์.....	36
3.3.2 การกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้าง .....	37
3.3.3 การสร้าง mesh และกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้า.....	38
3.3.4 โครงสร้างในการจำลองแบบ.....	38
บทที่ 4 กระบวนการสร้างแมกนีโททรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนและเทคโนโลยีการผลิตที่ เกี่ยวข้อง.....	41
4.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation process).....	41
4.1.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation).....	42

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.2 การออกซิเดชันแบบเปียก (Wet oxidation).....	42
4.1.3 การสร้างชั้นออกไซด์หนา (LOCOS oxidation).....	43
4.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process).....	44
4.2.1 การทำความสะอาดผิวหน้า (Wafer clean).....	45
4.2.2 การเตรียมผิวหน้า (Surface preparation).....	46
4.2.3 การเคลือบน้ำยาไวแสง (Photoresist Coating).....	47
4.2.3.1 น้ำยาไวแสง (Photoresist).....	47
4.2.3.2 วิธีการเคลือบ (Coating).....	48
4.2.4 การอบ (Prebake or Soft back).....	49
4.2.5 การปรับมาร์คและการฉายแสง (Alignment and Exposure).....	50
4.2.5.1 การปรับมาร์ค.....	50
4.2.5.2 การฉายแสง.....	52
4.2.6 การล้างน้ำยาไวแสง (Development).....	53
4.3 การกัด (Etching).....	53
4.3.1 การกัดแบบเปียก (Wet Etch).....	53
4.3.2 การกัดแบบแห้ง (Dry Etch).....	54
4.4 การแพร่สารเจือ (Diffusion).....	54
4.6.1 การแพร่สารเจือชนิดพี.....	55
4.6.2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น.....	56
4.5 การยิงฝังประจุ (Ion implantation).....	56
4.5.1 การยิงฝังประจุสารเจือชนิดพี (P-type).....	57
4.6.2 การยิงฝังประจุสารเจือชนิดเอ็น (N-type).....	57
4.6 การสร้างชั้นโลหะ (Metallization).....	58
4.7 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน.....	60
4.7.1 การออกแบบกระจกต้นแบบ (Mask Design).....	60
4.7.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน.....	63
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	70
5.1 การตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์.....	70
5.1.1 การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง $B_z$ .....	71
5.1.2 การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอน $B_y$ .....	73

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.1.3 การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน $B_x$ .....	74
5.2 การประยุกต์ใช้แมกนีโตทรานซิสเตอร์ในการวัดสนามแม่เหล็ก 3 แกน.....	75
5.2.1 โครงสร้างของอุปกรณ์.....	75
5.2.2 ขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก.....	75
5.2.3 การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง $B_z$ .....	76
5.2.4 การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน $B_y$ .....	77
5.2.5 การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน $B_x$ .....	81
5.3 การตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริง.....	82
5.3.1 วงจรวัดผลการทดลอง.....	82
5.3.2 การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง $B_z$ .....	84
5.3.3 การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน $B_y$ .....	85
5.3.4 การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน $B_x$ .....	85
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	88
เอกสารอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	92
ภาคผนวก (ก).....	93
ภาคผนวก (ข).....	94

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1	กระบวนการออกซิเดชันที่แตกต่างกัน.....	43
ตารางที่ 4.2	ขนาดสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง (Exposure Light Source) ชนิดต่างๆ.....	52
ตารางที่ 4.3	เปรียบเทียบคุณสมบัติในด้านต่างๆ ระหว่างกระบวนการแพร่สารเกี่ยวกับการยึงฝังประจุ.....	58
ตารางที่ 5.1	การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก.....	86

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....	5
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	6
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการได้ปในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค.....	8
รูปที่ 2.4 ด้านตัดขวางโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์.....	11
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวตั้ง (ก).มุมมองด้านบน และ (ข).ภาคตัดขวาง.....	13
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวนอน (ก).มุมมองด้านบน และ (ข). ภาคตัดขวาง.....	14
รูปที่ 2.7 ด้านตัดขวางโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง.....	15
รูปที่ 2.8 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน.....	16
รูปที่ 2.9 หลักการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน(ก).เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก และ (ข).เมื่อมีสนามแม่เหล็กที่ไม่เป็นศูนย์ตัดผ่าน.....	17
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา.....	18
รูปที่ 2.11 พื้นที่การเบี่ยงเบนของพาหะ(โฮล)ทำมุมเบี่ยงเบน $\theta_H$ .....	18
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน.....	19
รูปที่ 2.13 ความไม่เป็นเชิงเส้นของกราฟ.....	21
รูปที่ 2.14 ฮีสเตอร์ซิซิสสัญญาณเอาท์พุทที่แตกต่างไปจากค่าเดิม.....	22
รูปที่ 3.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง.....	24
รูปที่ 3.2 การจำลองแบบตัวอุปกรณ์โดยการจำลองการทำงานด้วย TCAD.....	24
รูปที่ 3.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของการจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ.....	25
รูปที่ 3.4 ภาพรวมของการจำลองโดย TCAD.....	25
รูปที่ 3.5 หน้าต่างการทำงานของ Sentaurus Workbench.....	26
รูปที่ 3.6 การยิงฝังประจุใน Sentaurus Process.....	27
รูปที่ 3.7 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Flow Editor.....	28
รูปที่ 3.8 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Layout Editor.....	29
รูปที่ 3.9 หน้าสัมผัสไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ในการจำลองการทำงาน.....	29
รูปที่ 3.10 การจำลองตัวอุปกรณ์หลังจากการสร้างเมส.....	30
รูปที่ 3.11 แผนผังไฟล์อินพุทและเอาท์พุทใน Sentaurus Device.....	31
รูปที่ 3.12 โปรแกรม Tecplot SV.....	35
รูปที่ 3.13 หน้าต่างในส่วนของ Inspect.....	35
รูปที่ 3.14 layout ของอุปกรณ์จากการจำลองแบบ TCAD.....	37

## สารบัญญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.15 การกำหนดชั้นตอนกระบวนการสร้างใน Ligament Flow.....	38
รูปที่ 3.16 การสร้างเมสและการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้า.....	39
รูปที่ 3.17 โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก.....	40
รูปที่ 4.1 กระบวนการเกิดชั้นออกไซด์บนผิวของแผ่นซิลิคอน.....	42
รูปที่ 4.2 การสร้างชั้นออกไซด์เฉพาะที่จากกระบวนการออกซิเดชัน.....	43
รูปที่ 4.3 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	45
รูปที่ 4.4 ชั้นตอนกระบวนการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์.....	46
รูปที่ 4.5 กระบวนการเตรียมผิวหน้าก่อนเคลือบน้ำยาไวแสง.....	46
รูปที่ 4.6 คุณสมบัติทางแสงที่แตกต่างกันของน้ำยาไวแสงสองชนิด.....	47
รูปที่ 4.7 การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีการสปินเนอร์.....	48
รูปที่ 4.8 การลอกฟิล์มที่ขอบของแผ่นผลึกหลังจากการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยการสปินเนอร์.....	49
รูปที่ 4.9 กระบวนการถ่ายแบบจากมาสค์ไปยังผิวของแผ่นเวเฟอร์.....	50
รูปที่ 4.10 กระบวนการปรับมาสค์และการฉายแสงด้วยระบบสเต็ปเปอร์ (Stepper).....	51
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบผลจากการกัดด้วยกระบวนการสองแบบ (ก) การแบบเปียก (Wet etch) และ (ข) การกัดแบบแห้ง (Dry etch).....	54
รูปที่ 4.12 ลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการแพร่สารเจือ.....	54
รูปที่ 4.13 ลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการยิงฝังประจุ.....	57
รูปที่ 4.14 การต่อชั้นโลหะสำหรับเชื่อมต่อตัวอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก.....	58
รูปที่ 4.15 กระบวนการระเหยในสุญญากาศ (Evaporation).....	59
รูปที่ 4.16 (ก) - (ฉ) ชั้นทั้งหมดสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับ สนามแม่เหล็ก 3 แกน.....	61
รูปที่ 4.17 โครงสร้างของอุปกรณ์.....	62
รูปที่ 4.18 กระจกต้นแบบ.....	62
รูปที่ 4.19 แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น.....	63
รูปที่ 4.20 การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์.....	63
รูปที่ 4.21 การสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์.....	63
รูปที่ 4.22 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีขั้นที่ 1 (ก) การเคลือบน้ำยาไวแสงและ (ข) การ develop.....	64
รูปที่ 4.23 (ก) การกัดไนไตรด์และ (ข) ล้างน้ำยาไวแสง.....	64

## สารบัญญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.24 (ก) การสร้างชั้น LOCOS oxide และ (ข) การกัดชั้นไนไตรด์.....	64
รูปที่ 4.25 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีขั้นที่ 2 หลังจากผ่านการ develop.....	65
รูปที่ 4.26 (ก) การยิงฝัประจุฟอสฟอรัสและ (ข) การล้างน้ำยาไวแสง.....	65
รูปที่ 4.27 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีขั้นที่ 3 หลังจากผ่านการ develop.....	65
รูปที่ 4.28 (ก) การยิงฝัประจุโบรอนและ (ข) การล้างน้ำยาไวแสง.....	66
รูปที่ 4.29 การสร้างชั้น TEOS.....	66
รูปที่ 4.30 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีขั้นที่ 4 หลังจากผ่านการ develop.....	66
รูปที่ 4.31 (ก) การกัดชั้นออกไซด์และ (ข) ล้างน้ำยาไวแสงจากนั้น (ค) สร้างชั้นโลหะ.....	67
รูปที่ 4.32 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีขั้นที่ 5 หลังจากผ่านการ develop.....	67
รูปที่ 4.33 (ก) การกัดชั้นโลหะส่วนที่ไม่ต้องการและ (ข) การสร้างชั้นไนไตรด์.....	68
รูปที่ 4.34 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีขั้นที่ 6 หลังจากผ่านการ develop.....	68
รูปที่ 4.35 (ก) การกัดชั้นไนไตรด์จากนั้น (ข) ล้างชั้นน้ำยาไวแสงและ (ค) อุปกรณ์ที่เสร็จสมบูรณ์...69	
รูปที่ 4.36 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนในแผ่นซิลิคอนที่สร้างเสร็จ เรียบร้อยแล้ว.....	69
รูปที่ 5.1 ความหนาแน่นกระแสโดยการจำลองแบบ 3 มิติขณะไม่มีสนามแม่เหล็กในกรณี (ก) ไม่ได้ปรับค่าออฟเซต (ข) เมื่อปรับค่าออฟเซต.....	71
รูปที่ 5.2 ผลการเบี่ยงเบนของพาหะของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ขณะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ทิศทาง Z.....	72
รูปที่ 5.3 กราฟผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง Z.....	72
รูปที่ 5.4 ทิศทางของพาหะขณะมีสนามแม่เหล็กแนวอน (By).....	73
รูปที่ 5.5 กราฟผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง Y.....	74
รูปที่ 5.6 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน.....	75
รูปที่ 5.7 การไหลของกระแสพาหะขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก (B=0).....	76
รูปที่ 5.8 ทิศทางการเบี่ยงเบนของพาหะขณะตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง Bz.....	76
รูปที่ 5.9 กราฟผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง Z แบบรวมกระแส.....	77
รูปที่ 5.10 ทิศทางการเบี่ยงเบนของพาหะขณะตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน By.....	78
รูปที่ 5.11 กราฟผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทิศทาง Y แบบรวมกระแส.....	78
รูปที่ 5.12 การกำหนดทิศทางกระแสและทิศทางสนามแม่เหล็กของการจำลองการทำงาน.....	79

## สารบัญรูปรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.13 ความหนาแน่นกระแสโดยการจำลอง 3 มิติของ (ก) ขั้ว B(2)-C(2) และ (ข) ขั้ว B(4)-C(4) ขณะมีสนามแม่เหล็กแนวนอน.....	80
รูปที่ 5.14 กราฟการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวนอน(แกน $y$ ) ของขั้ว B(2)-C(2) และ ขั้ว B(4)-C(4).....	80
รูปที่ 5.15 ทิศทางการเบี่ยงเบนของพาหะขณะตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอน $B_x$ .....	81
รูปที่ 5.16 กราฟผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทิศทาง $X$ แบบรวมกระแส.....	82
รูปที่ 5.17 วงจรวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับ สนามแม่เหล็ก 3 แกน.....	83
รูปที่ 5.18 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุทและความหนาแน่นสนามแม่เหล็กใน การตรวจจับสนามแม่เหล็ก $B_z$ .....	84
รูปที่ 5.19 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุทและความหนาแน่นสนามแม่เหล็กใน การตรวจจับสนามแม่เหล็ก $B_y$ .....	85
รูปที่ 5.20 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุทและความหนาแน่นสนามแม่เหล็กใน การตรวจจับสนามแม่เหล็ก $B_x$ .....	86

# บทที่ 1

## บทนำ

การวัดสนามแม่เหล็กในหลายมิติ เพื่อใช้งานในการบอกทิศทางสนามแม่เหล็กนั้นปกติต้องใช้ อุปกรณ์ฮอลล์เท่ากับจำนวนมิติที่ต้องการวัด ตัวอย่างเช่นการวัดสนามแม่เหล็กใน 3 มิติ ต้องใช้ อุปกรณ์ฮอลล์สามตัวเพราะอุปกรณ์ฮอลล์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทิศทางเดียวที่ตั้งฉากกับ ผิวด้านบนของอุปกรณ์เท่านั้น อุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่เคยมีการวิจัยเป็นอุปกรณ์ที่สามารถ ตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางเดียวที่ตั้งฉากเช่นเดียวกันกับอุปกรณ์ฮอลล์โดยเป็นอุปกรณ์ที่มี 5 ขั้ว เหตุผลเพราะหลักการทำงานใช้ผลการเลี้ยวเบนของพาหะเพียงอย่างเดียว แต่สามารถพัฒนาให้ สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในสองมิติได้โดยการเพิ่มขั้วคอลเลคเตอร์อีกสองขั้ว และในสามมิติต้อง เพิ่มขั้วคอลเลคเตอร์อีก 4 ขั้วรวมเป็นขั้วคอลเลคเตอร์ 8 ขั้ว ขั้วเบส 4 ขั้ว และอิมิตเตอร์ 1 ขั้วซึ่งไม่ เหมาะแก่การใช้งานเป็นอุปกรณ์เดี่ยว แต่อาจใช้งานในรูปร่างรวมที่สามารถสร้างวงจรรวมกับ แมกนีโตทรานซิสเตอร์

อุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมีความแตกต่างจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีการวิจัย กันอยู่ก่อน อาศัยหลักการการทำงานที่ใช้การรวมตัวของพาหะร่วมกับการเลี้ยวเบนของพาหะทำให้ผลต่าง กระแสที่พู่ใช้ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและคอลเลคเตอร์ทำให้ลดจำนวนขาคอลเลคเตอร์ลง และเมื่อนำมาใช้งานตรวจจับสนามแม่เหล็กสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในสองมิติและสามมิติได้ โดยเพิ่มเพียงขาคอลเลคเตอร์อีกหนึ่งคอลเลคเตอร์เท่านั้น ทำให้อุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กสามมิติ/สองมิติด้วยอุปกรณ์เพียง 4 ขาคืออิมิตเตอร์ 1 เบส 1 และคอลเลคเตอร์ 2 ซึ่งลดความซับซ้อนลงไปมากและการทำงานกว้างขวางมากกว่า สามารถที่ พัฒนาเป็นอุปกรณ์เดี่ยวและใช้งานแบบวงจรรวมได้ทั้งสองแบบ สำหรับความสมมาตรของเอาต์พุตในการ การตรวจจับสนามแม่เหล็กเปรียบเทียบกันจากกลไกการทำงานในการใช้งานแบบหลายมิติแล้วถือว่า มีใกล้เคียงกันมาก

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการประดิษฐ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามขาที่แตกต่างจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั่วไป โดยออกแบบให้มีโครงสร้างเหมือนกับทรานซิสเตอร์ที่ใช้งานทั่วไปเป็นอุปกรณ์เดี่ยวเหมือนกับอุปกรณ์ ฮอลล์โดยลดจำนวนขาและความซับซ้อน และได้พัฒนาต่อเนื่องจนมีการกินพลังงานที่ต่ำและมีความไวสูงขึ้น และได้มีการประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องวัดความเร็วมอเตอร์ เครื่องวัดกระแสดีซี เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก รวมถึงภาคเอกชนนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมภายในประเทศ รวมถึงจด สิทธิบัตร(อยู่ในขั้นตอนตรวจสอบ)และนำเผยแพร่บทความในวารสารนานาชาติ อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ และพัฒนาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางพุ่งตั้งฉากพื้นผิว และทิศทางขนานกับพื้นผิวอีก ทิศทางอีกเพียงทิศทางหนึ่งได้เป็นได้เป็นอย่างดี แต่การที่จะวัดทิศทางสนามแม่เหล็กในแนวอื่น ต้อง ใช้อุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์เพิ่มเติม ซึ่งเหมือนกับอุปกรณ์ฮอลล์ถ้าต้องการวัดสนามแม่เหล็ก

แบบ 3 มิติต้องใช้อุปกรณ์ฮอลล์ 3 ตัวแต่อาจจะต้องใช้อุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์นี้เพียง 2 ตัว การวัดสนามแม่เหล็ก 2 มิติต้องใช้อุปกรณ์ฮอลล์ 2 ตัว และการวัดสนามแม่เหล็กต้องใช้อุปกรณ์ฮอลล์ 3 ตัว แต่อย่างไรก็ตามแม้อุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่วิจัยตัวหนึ่ง จะสามารถวัดทิศทางได้ถึงสองทิศทาง ก็ยังไม่เหมาะสมที่จะใช้งานแบบ 2 มิติอย่างแท้จริง และไม่สามารถใช้งานแบบ 3 มิติได้ ดังนั้นผู้วิจัยมีแนวทางพัฒนาให้แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดนี้สามารถวัดสนามแม่เหล็ก 3 มิติโดยใช้แมกนีโตทรานซิสเตอร์เพียงตัวเดียว วางตำแหน่งคงที่ไม่ต้องเคลื่อนย้ายใดๆ และสามารถใช้งานแบบ 2 มิติได้โดยตรง(สมมาตรใน 2 มิติ) ซึ่งต่างจากเดิม(ที่พัฒนาขึ้น)ซึ่งสามารถวัดได้ 2 มิติแต่ยังไม่สมมาตร นอกจากนี้ยังคงรักษาการกินพลังงานต่ำและความไวสูงที่ได้พัฒนาไว้เหมือนเช่นเดิม และยังสามารถใช้ในโหมดการทำงานทั้งแบบแบบ 3 ขา และแบบมากกว่า 3 ขาให้เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานตามความเหมาะสม และเทคโนโลยีการผลิตไม่แตกต่างจากอุปกรณ์ฮอลล์ในท้องตลาดที่ราคาไม่แพงและสามารถสร้างร่วมกับวงจรรวมได้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1 สร้างนวัตกรรมจากองค์ความรู้ที่มีอยู่
- 2 พัฒนาบุคลากร นักศึกษาจากการวิจัยแบบพึ่งพิงตนเอง
- 3 สร้างองค์ความรู้ใหม่ ต่อยอดและประยุกต์องค์ความรู้เดิม
- 4 เผยแพร่ความรู้สู่สาธารณะในรูปบทความในวารสารนานาชาติ

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบการเลี้ยวเบนและการรวมตัวของพาหะสามารถที่นำมาประยุกต์ใช้งานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแกน X แกน Y และแกน Z
2. โครงสร้างนี้สามารถใช้งานในลักษณะแยกขั้ว และยังสามารถที่วัดได้แบบโครงสร้างที่รวมขั้วไฟฟ้าได้
3. การทำงานแบบรวมขั้วไฟฟ้าสามารถทำงานได้เพราะว่าโครงสร้างที่ไม่สมมาตรเท่านั้น

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่เกี่ยวข้อง

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่วิจัยขึ้น(ได้รับทุนสนับสนุนจากสภาวิจัยแห่งชาติ)ใช้กลไกการเลี้ยวเบนของพาหะที่ฉีดจากอิมิตเตอร์ผ่านเบสไปยังเลคเตอร์ กับการรวมตัวของพาหะในชั้นวัสดุเบสทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและคอลเลคเตอร์ขณะที่ได้รับสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับพื้นผิวด้านบนแมกนีโตทรานซิสเตอร์ (มิติแกน Z) ซึ่งสามารถตรวจจับทั้งปริมาณและทิศทางสนามแม่เหล็กได้ มีความเป็นเชิงเส้นสูง และได้ทำการพัฒนาต่อให้กินพลังงานต่ำและขณะเดียวกันได้ความไวที่สูงขึ้น อาศัยหลักการที่ว่า กระแสของอุปกรณ์ที่ใช้จะมีสัดส่วนต่อเอาท์พุทเกือบทั้งหมด โดยลดส่วนกระแสที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอาท์พุทลงอย่างมาก การกินพลังงานจึงต่ำและได้ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่

สูงขึ้น นอกจากนั้นสามารถวัดค่าสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับพื้นผิวอุปกรณ์ได้อีกหนึ่งมิติ (มิติ X หรือมิติแกน Y ขึ้นอยู่กับโครงสร้างกายภาพ) แต่อย่างไรก็ตามเป็นอุปกรณ์ที่ถือว่าตรวจจับสนามแม่เหล็กทั้งขนาดและทิศทางได้สองแกนแต่ยังไม่เหมาะสมกับงาน 2 มิตินี้กันเนื่องจากความไม่สมมาตรในแต่ละทิศทาง

ในการวิจัยนี้เน้นการเพิ่มศักยภาพของอุปกรณ์ในการทำงานในหลายมิติ คือ 2 มิติและ 3 มิติโดยคุณสมบัติอุปกรณ์ที่พัฒนาของเดิมที่ทำการวิจัยยังอยู่ครบคือ การกินพลังงานต่ำและความไวที่สูงยังคงไม่เปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด แต่ได้เพิ่มการทำงานแบบ 2 มิติที่มีความสมมาตรและการใช้งานใช้งานตรวจจับแบบ 3 มิติโดยใช้อุปกรณ์เพียงตัวเดียวโดยอุปกรณ์ไม่ต้องมีการเคลื่อนที่แต่อย่างใดและยังสามารถทำงานในโหมดที่ใช้เพียงขา 3 ขาเหมือนทรานซิสเตอร์ปกติทั่วไปในการใช้งานตรวจจับใน 1-3 มิติ หรือจะเลือกใช้งานในโหมดที่มากกว่า 3 ขา(6 ขา)เพื่อประยุกต์เฉพาะงานพิเศษ 2 มิติและ 3 มิติ(อุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั่วไปต้องใช้ตั้งแต่ 13 ขาเป็นอย่างน้อยไม่สะดวกในการใช้งานและสิ้นเปลืองแหล่งจ่ายในวงจรจึงไม่มีการใช้งานแบบอุปกรณ์เดี่ยวแต่เป็นในรูปวงจรรวม)เช่นการใช้งานเป็นเข็มทิศแม่เหล็ก(Magnetic compass) บอกทิศทางสนามแม่เหล็กแบบ 2 มิติ(plane)หรือ 3 มิติ(space) โดยสามารถบอกได้ทั้งปริมาณและทิศทางโดยอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนและการรวมตัวของพาหะที่ผู้วิจัยได้พัฒนาและวิจัยมาตั้งแต่เริ่มต้นซึ่งการพัฒนาครั้งนี้จะทำให้นวัตกรรมอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถใช้งานแบบอุปกรณ์เดี่ยวได้อย่างกว้างขวางมากและสะดวกแก่การใช้งาน

## 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1 ออกแบบ จำลองแบบ และสร้างอุปกรณ์เซนเซอร์ตรวจจับแม่เหล็ก
- 2 ทดสอบ วัดผลการทดลองจากอุปกรณ์
- 3 สรุปผล เผยแพร่ผลงานในวารสารนานาชาติ

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1 ขั้นตอนแรกทำการออกแบบและจำลองแบบการทำงานจากโปรแกรมเฉพาะทางสำหรับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เป็นโปรแกรมมาตรฐานในอุตสาหกรรม โดยออกแบบ และศึกษาตัวแปร มิติที่เกี่ยวข้องและทำการจำลองแบบเบื้องต้น ขั้นตอนนี้จะศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมดพร้อมทั้งปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพดีที่สุด

2 นำสิ่งที่ได้ออกแบบในรูปแบบต่างๆ มาทำการสร้างในห้องปฏิบัติการไมโครอิเล็กทรอนิกส์ โดยทำแม่เหล็ก ขั้นตอนออกซิเดชัน โฟโตลิโธกราฟี การกัด การเคลือบโลหะ การแพร่สารเจือ การต่อขั้วไฟฟ้า

3 ทำการวัดทดสอบกับสนามแม่เหล็ก สรุปผล และเผยแพร่ผลงานในวารสารวิชาการนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล ISI หรือ Scopus หรือ TCI และการประชุมวิชาการนานาชาติ

โดยเนื้อหาในงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็นบทต่างๆตามรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ

เป็นบทนำ ซึ่งกล่าวถึงวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีหรือแนวคิดของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัยและขั้นตอนของการศึกษาสำหรับงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เป็นทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฮอลล์และปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้อง คุณสมบัติทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับสนามแม่เหล็กและการตรวจจับใน 2 มิติและ 3 มิติและแนวคิดในการจำลองการออกแบบในสามมิติ

บทที่ 3 โปรแกรมการจำลองแบบ Sentaurus TCAD และการจำลองแบบการทดลอง

กล่าวถึงเทคโนโลยี TCAD เบื้องต้นและการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม TCAD ในการออกแบบโครงสร้างที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง

กล่าวถึงผลการวัดผลการทดลองและการจำลองแบบเปรียบเทียบกัน

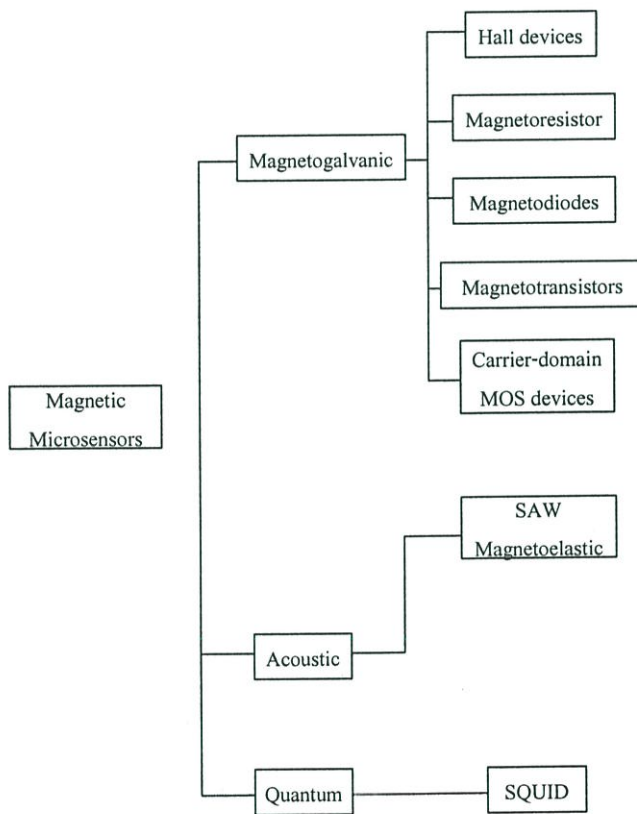
บทที่ 5 การประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์ใช้งาน

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง สรุปผลการทดลองทั้งหมดและข้อเสนอแนะต่างๆ

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

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

โดยสามารถจำแนกชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ซึ่งจำแนกตามหลักการการทำงานพื้นฐานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแต่ละอุปกรณ์แต่ละชนิดได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

### 2.1 อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Plates)

#### 2.1.1 หลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์

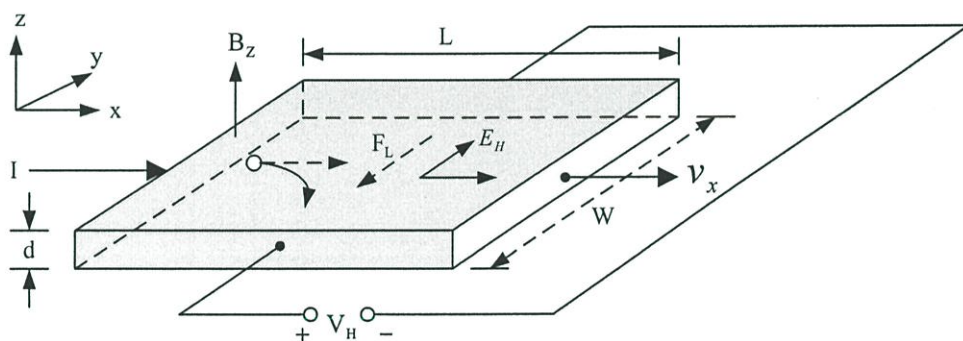
ใน ค.ศ. 1879 เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) ได้พบว่า เมื่อนำแผ่นตัวนำบางที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก พาหะประจุ (charge carriers) ในตัวนำสามารถเบนไปจาก

แนวทางเดิมได้ และการเบนนี้มีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในตัวนำบางในทิศตั้งฉากกับทั้งกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก การค้นพบนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์

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

พิจารณาแผ่นฮอลล์เพลตดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อนำไปต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟที่มีค่าความต่างศักย์  $V$  โวลต์ ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส (current density)  $J_x$  ไหลในทิศ  $+X$  และให้สนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น (flux density)  $B_z$  ตัดผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศ  $+Z$

เมื่อโฮล (Hole) คือพาหะส่วนมากและมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นบวก ได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าในทิศทาง  $+X$  ส่งผลให้เกิดมีแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว drift (drift velocity)  $v_x$  ในทิศทาง  $+X$  และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก  $B_z$  ตัดผ่านในทิศตั้งฉากกับกระแส จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อโฮล ดังสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

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

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

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

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

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

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

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

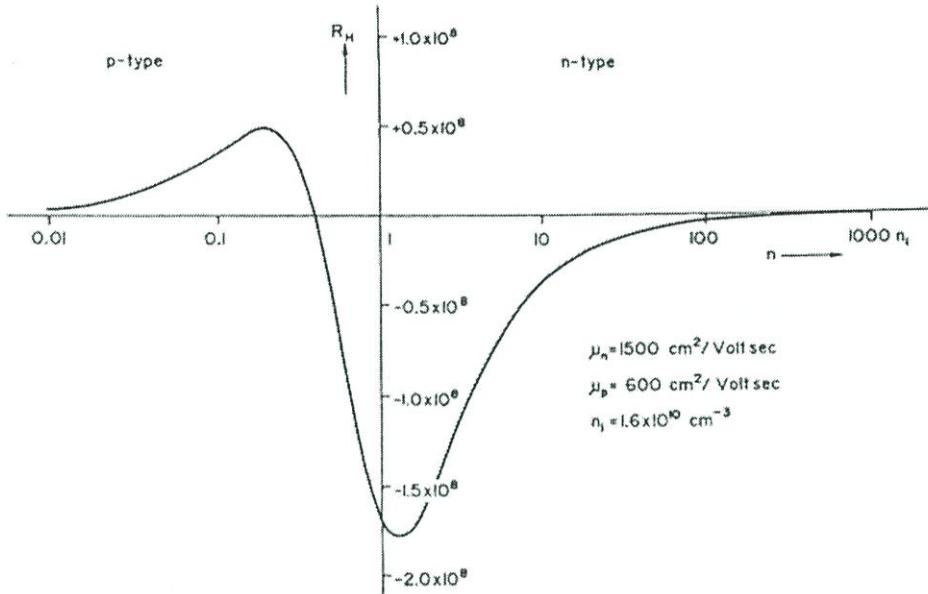
ดังนั้นแทนค่า  $v_x$  ในสมการที่ 2.5 ลงในสมการที่ 2.4 จะได้ค่าสนามไฟฟ้าภายในดังสมการต่อไปนี้

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

จากสมการที่ 2.6 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าคงที่ได้ดังนี้

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

เมื่อค่า  $R_H$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก

จากรูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดอินทรีนซิกซึ่งเปลี่ยนแปลงสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าการโด๊ประดับต่ำสามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่มีค่าสูงได้ แต่โดยส่วนมากแล้วจะไม่เลือกใช้ในการโด๊ประดับต่ำสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์ฮอลล์จะเป็นผลให้แรงดันฮอลล์ที่ได้มีค่าลดลง โดยค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเลือกใช้ได้จากการคำนวณซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณการโด๊ปในสารกึ่งตัวนำ

จากรูป 2.2 เมื่อทำการวัดแรงดันระหว่างด้านหน้า และด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ  $w$  จะได้

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

โดย  $V_H$  คือแรงดันฮอลล์ ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ

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

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

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

ดังนั้นจะได้สมการแรงดันฮอลล์ในรูปของกระแสกับสนามแม่เหล็กคือ

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

จากสมการที่ 2.9 และ 2.10 สามารถหาสมการความหนาแน่นของโฮลได้ดังนี้

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

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

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

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

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

จากสมการ (2.11), (2.12) และ (2.13) จะเห็นว่า การทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ ที่สำคัญของแท่งสารกึ่งตัวนำได้ คือ ความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะได้เป็นอย่างดี

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

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

ดังนั้นโดยการวัดแรงดันฮอลล์ ทำให้เราสามารถบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำได้ว่าเป็นสารชนิดเอ็น หรือชนิดพีได้ ขณะที่ค่าความไวในการตอบสนอง (Sensitivity: S) คือ อัตราส่วนระหว่างแรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแสและสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

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

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

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

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

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

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

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

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

ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันของพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ถูกต้องนัก ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ  $R_{Hc}$  สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้โดย

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

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

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

เมื่อ  $\mu_H$  คือ ค่าสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ (Hall mobility)

และ  $\mu_{Hi}$  คือ ค่าสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับแลทธิซ

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

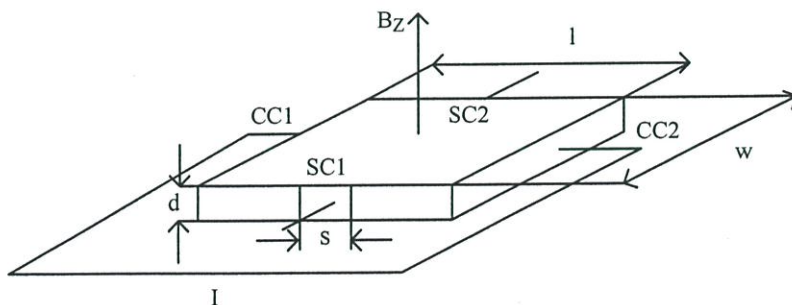
$$R_{Hi} = \frac{315\pi}{512} R_H = 1.93R_H \quad (2.20)$$

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

เมื่อ  $\mu_{Hi}$  คือ ค่าสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ และ  $\mu_p$  คือ ค่า Mobility ของโฮล

### 2.1.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

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



รูปที่ 2.4 ด้านตัดขวางโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

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

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

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

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

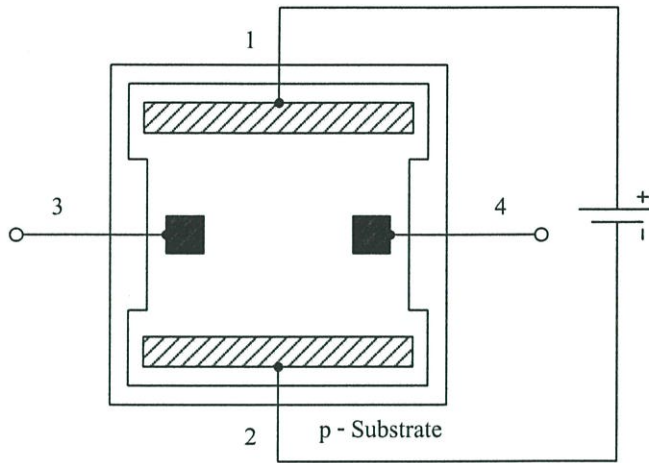
โดยที่  $r_n$  คือ พารามิเตอร์การกระเจิง (scattering parameter)

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

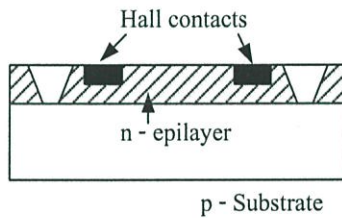
$$G = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2} \cdot \frac{l}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H}\right) \right] \cdot \left[ 1 - \frac{2}{\pi} \cdot \frac{s}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H} \right] \quad (2.24)$$

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

ในปัจจุบันอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งและแนวนอน ซึ่งแบ่งตามความสามารถในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยรูปที่ 2.5(ก) และ 2.5(ข) แสดงมุมมองด้านบนและด้านภาคตัดขวางของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวตั้งชนิดเอ็น โดยสร้างบนฐานรองชนิดพีและสร้างด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์



(ก).

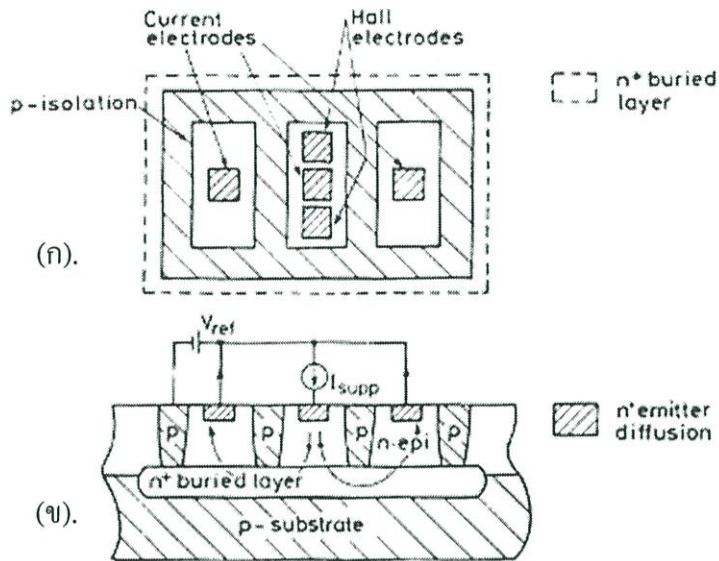


(ข).

รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แวนดิง (ก).มุมมองด้านบน และ (ข).ภาคตัดขวาง

กระแสจะไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 และ 2 ขณะที่แรงดันฮอลล์ถูกวัดระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 และ 4 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ  $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  และมีความหนาชั้นอิพิทาเซียระหว่าง  $5 - 10 \mu\text{m}$  โดยที่ออกแบบมิติของเฟลทประมาณ  $200 \times 200 \mu\text{m}$  สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชั้นอิพิสามารถลดลงได้โดยใช้วิธีการยิงฝังประจุ (Ion implantation) ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้ขนาดของแผ่นอุปกรณ์ฮอลล์มีความสม่ำเสมอได้

อุปกรณ์ฮอลล์ที่ใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนดิงแต่สามารถประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนอนอนได้โดยเรียกว่าอุปกรณ์ฮอลล์แวนอนอน โดยแสดงดังรูปที่ 2.6(ก) และ 2.6 (ข) โดยที่โครงสร้างนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นพื้นฐานที่จะสร้างเข็มทิศแม่เหล็ก โดยพื้นที่ของอิเล็กโทรดออกแบบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และพาหะจะมีทิศทางการฉีดในลักษณะแวนดิง เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางขนานกับผิวของอุปกรณ์



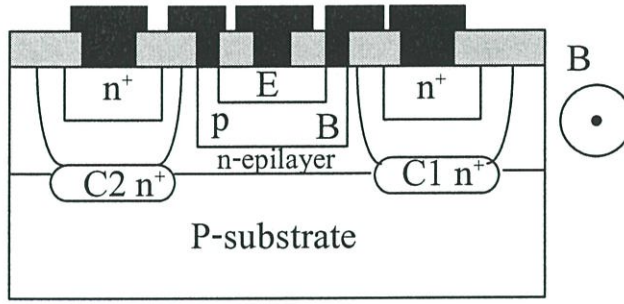
รูปที่ 2.6 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แวนอน (ก) มุมมองด้านบน และ (ข) ภาคตัดขวาง

## 2.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor)

แมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีโครงสร้างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Bipolar transistor) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (Vertical magnetotransistor) และ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน (Lateral magnetotransistor) ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ ที่ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะ ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง โดยกลไกในการเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C$ ) ขึ้นอยู่กับการเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (Modulation current injection)

### 2.2.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง

โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง แสดงดังรูปที่ 2.7 โครงสร้างประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด npn สองตัวต่อกันด้วยอิมิตเตอร์ร่วมและเบสร่วม มีชั้นฝัง (buried layer) อยู่ใต้ส่วนเบส คอลเลคเตอร์ทั้งสองสร้างจากอะตอมสารเจือชนิด  $n^+$  เพื่อไม่ให้ข้อต่อเซอร์กิตจึงกำหนดให้มีช่องว่างระหว่าง ชั้นฝัง (buried layer) ทั้งสอง



รูปที่ 2.7 ด้านตัดขวางโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง

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

$$I_{C0} = I_{C1} + I_{C2} \quad (2.25)$$

เมื่อ  $I_{C0}$  คือผลรวมของกระแสคอลเลคเตอร์

$$\Delta I_C = G \cdot \mu_n^* (L/W) \cdot I_{C0} \cdot B \quad (2.26)$$

โดยที่  $L$  คือระยะระหว่างอิมิตเตอร์กับคอลเลคเตอร์,  $W$  คือความกว้างอิมิตเตอร์ และ  $G$  คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับโครงสร้างของอุปกรณ์ และ  $\mu_n^*$  คือค่า mobility โดยสามารถหาค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้จากสมการที่ 2.27

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

แทนสมการที่ 2.26 ลงในสมการที่ 2.27 จะได้

$$S = G \cdot \mu_n^* \cdot \frac{L}{W_E} \quad (2.28)$$

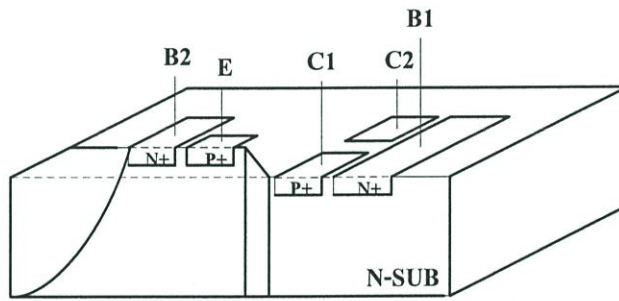
ในสภาวะปกติขณะที่ปราศจากสนามแม่เหล็กตัดผ่าน สามารถหาความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ตั้งสมการที่ (2.29) และ (2.30)

$$S_A = \left| \frac{\partial V_C}{\partial B} \right|_{B=0} = R_C^{-1} \left| \frac{\partial I_C}{\partial B} \right|_{B=0} \quad (2.29)$$

$$S = V_C^{-1} \left| \frac{\partial V_C}{\partial B} \right|_{B=0} = I_C^{-1} \left| \frac{\partial I_C}{\partial B} \right|_{B=0} \quad (2.30)$$

### 2.2.2 แมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน

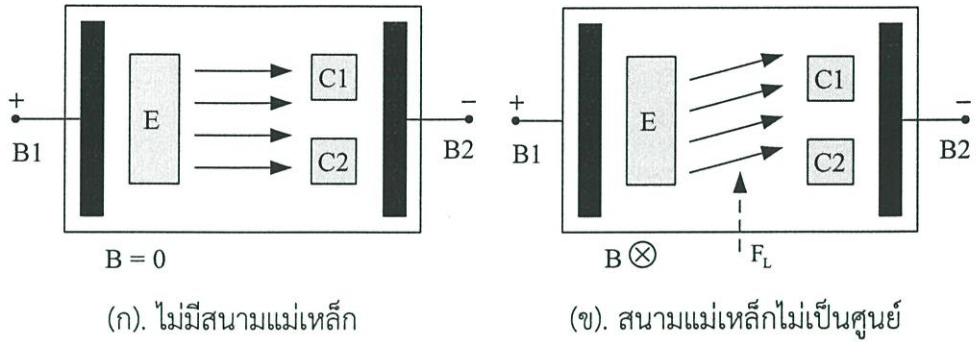
โครงสร้างของแมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน แสดงดังรูปที่ 2.8 โดยประกอบด้วย อิมิตเตอร์(E), เบส (B1, B2) และคอลเลคเตอร์ (C1, C2)



รูปที่ 2.8 แมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน

โดยการทำงานพาหะจะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปถึงคอลเลคเตอร์ที่แยกกันอยู่สองข้างอย่างสมมาตร โดยสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C$ ) กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection)

หลักการทำงานคือ เมื่ออิมิตเตอร์และเบสถูกไบอัสไปข้างหน้าพาหะส่วนมาก (majority carriers) จากอิมิตเตอร์จะถูกฉีดเข้าไปในเบสและเข้าไปยังคอลเลคเตอร์ โดยสนามไฟฟ้าในเบสจะช่วยให้พาหะเกิดการเคลื่อนที่จากเบสไปยังคอลเลคเตอร์ได้เพิ่มขึ้น ซึ่งในสภาวะปกติที่ปราศจากสนามแม่เหล็ก ( $B = 0$ ) ปริมาณกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากันนั่นคือผลต่างของกระแสคอลเลคเตอร์จะเป็นศูนย์ ( $\Delta I_C = 0$ ) แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ส่งผลให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากทิศทางเดิม ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะสมดุล ผลต่างของกระแสคอลเลคเตอร์ไม่เป็นศูนย์ ( $\Delta I_C \neq 0$ ) จาก การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 หลักการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดพาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน  
 (ก).เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก และ (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  $\Delta I_C$  กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ซึ่ง  $\Delta I_C$  แปรผันตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสमितเตอร์ ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบสัมผัสและแบบสมบูรณ์ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.34) และ (2.35) ตามลำดับ

$$\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2} \quad (2.31)$$

$$I_{C0} = I_{C1} + I_{C2} \quad (2.32)$$

$$\Delta I_C = K_g (\mu_p + \mu_n) B_z \cdot I_E \quad (2.33)$$

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

$K_g$  เป็นค่าคงที่ที่มีความสัมพันธ์กับรูปร่างลักษณะของตัวอุปกรณ์

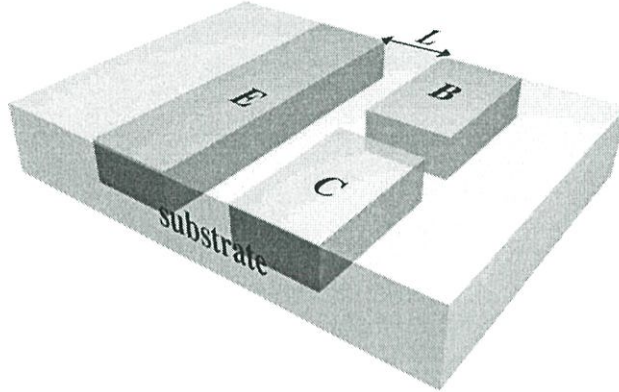
$$S_R = \frac{\Delta I_C}{I_{C0} \cdot \Delta B_z} \quad (2.34)$$

$$S_A = \frac{\Delta V}{\Delta B_z} \quad (2.35)$$

เมื่อ  $I_{C0}$  คือแหล่งจ่ายกระแสคงที่ และ  $\Delta B_z$  คือการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก

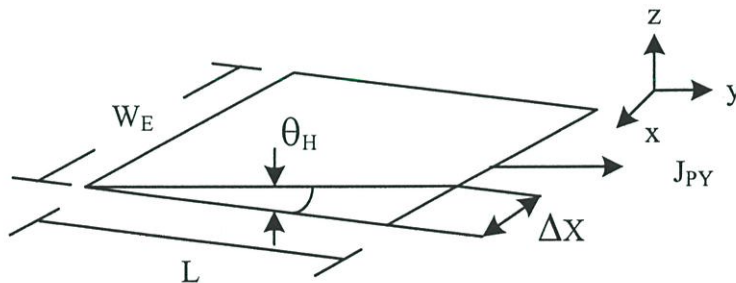
### 2.2.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา (Three terminal magnetotransistor)

โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาแสดงดังรูปที่ 2.10 เป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ pnp ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน ประกอบด้วย อิมิตเตอร์ E, เบส B และคอลเลคเตอร์ C โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาเป็นการพัฒนาจากโครงสร้างปกติห้าขาเพื่อสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวนอน โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัวในเบสเป็นกระแสเบสและพาหะที่เปี่ยงเบนเป็นกระแสคอลเลคเตอร์



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขา

แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบโครงสร้างสามขาในภาวะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กปริมาณพาหะโฮลเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ข้ามเบสไปยังคอลเลคเตอร์เป็นกระแสคอลเลคเตอร์เท่ากับปริมาณพาหะโฮลที่รวมตัว (recombination) ในเบสเป็นกระแสเบส แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตั้งฉากแนวตั้ง (ทิศทาง z) ตัดผ่านตัวอุปกรณ์ พาหะถูกกระทำโดยแรงลอเรนซ์ ทำให้พาหะเปี่ยงเบนและเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ การวิเคราะห์การทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.11 โดยกระแสอิมิตเตอร์คือการรวมกันของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ดังสมการที่ (2.36)



รูปที่ 2.11 พื้นที่การเปี่ยงเบนของพาหะ (โฮล) ทำมุมเปี่ยงเบน  $\theta_H$

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

กระแสอิมิตเตอร์สามารถแสดงอยู่ในเทอมของปริมาณความหนาแน่นของโฮล  $J_{PY}$  ดังสมการ 2.37

$$I_E = J_{PY} \cdot W_E \cdot d \quad (2.37)$$

โดยที่  $W_E$  คือความกว้างอิมิตเตอร์ และ  $d$  คือความลึกกรวยต่อ

การไม่สมดุลของกระแสที่มีความสัมพันธ์กับความกว้างขวางเบส  $W_B$ , สภาพความคล่องตัวของโฮล  $\mu_p$  และความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก  $B_z$  ดังสมการที่ (2.39) กระแสไหลตามแนวอนเบี่ยงเบนในมุม  $\theta_H$  ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ (2.38)

$$\tan \theta_H = \mu_p \cdot B_z \quad (2.38)$$

$$(\Delta X) = L \cdot \mu_p \cdot B_z \quad (2.39)$$

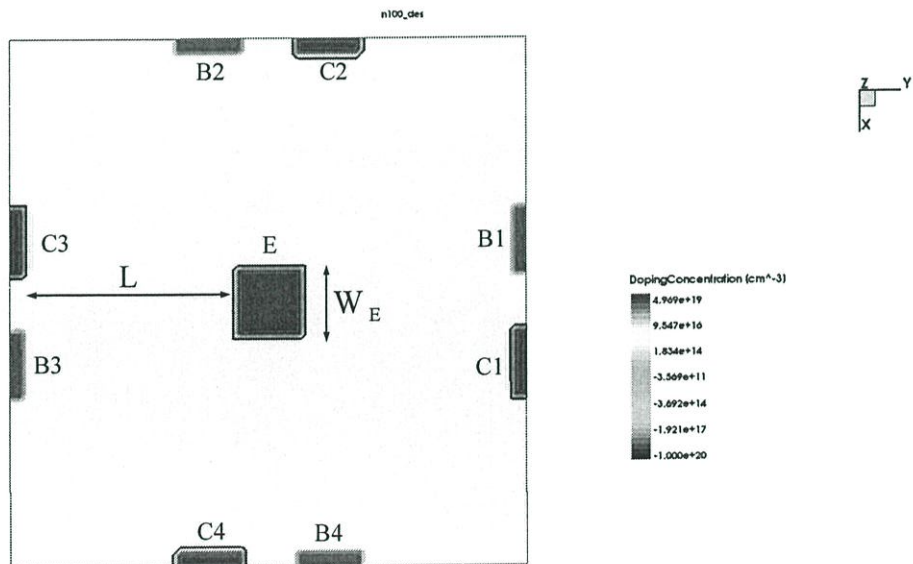
$$\Delta I_{CB} = J_{PY} \cdot W_E \cdot L \cdot \tan \theta_H \quad (2.40)$$

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

$$S_R = \frac{\Delta I_{CB}}{I_E \cdot B_z} \quad (2.41)$$

แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งทิศทางแนวตั้งและแนวอน ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับ การเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีผลของกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection)

### 2.2.4 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน (3 axis magnetotransistor)



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

โครงสร้างของอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 2.12 อุปกรณ์ถูกพัฒนามาจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ 3 ขา โดยใช้แมกนีโตทรานซิสเตอร์ 4 ตัวรวมกันเพื่อใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน (X, Y

และ Z) โดยใช้มิติเตอร์ร่วมกัน ส่วนเบสและคอลเลคเตอร์แยกจากกัน อุปกรณ์ประกอบไปด้วย มิติเตอร์ 1 ขั้ว เบส 4 ขั้วและคอลเลคเตอร์ 4 ขั้ว มิติเตอร์และคอลเลคเตอร์ถูกได้ปด้วยอะตอม สารเจือปนโบรอน และเบสถูกได้ปด้วยอะตอมสารเจือปนฟอสฟอรัส โดยการทำงานพื้นฐานจะเหมือนกับ แมกนีโททรานซิสเตอร์แบบ 3 ขาคืออาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัวในเบสเป็นกระแสเบส และพาหะที่เบี่ยงเบนเป็นกระแสคอลเลคเตอร์

โดยจากรูปที่ 2.12 เมื่อไบอัสมิติเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่และมีสนามแม่เหล็กมาตาม แนวแกน z แมกนีโททรานซิสเตอร์ทั้ง 4 ตัว จะเกิดการเบี่ยงเบนของพาหะไปตามทิศแรงลอเรนซ์ เนื่องจากว่าสนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับกระแส และเมื่อมีสนามแม่เหล็กมาตามแกน y จะเกิดการ เบี่ยงเบนของพาหะที่เฉพาะแมกนีโททรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 และ 4 เท่านั้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กมี ทิศทางตั้งฉากกับกระแส ส่วนแมกนีโททรานซิสเตอร์ตัวที่ 1 และ 3 จะไม่เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะ เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับกระแส ในทำนองเดียวกันถ้ามีสนามแม่เหล็กมาตามแกน x การเบี่ยงเบนจะเกิดขึ้นที่แมกนีโททรานซิสเตอร์ตัวที่ 1 และ 3 ส่วนแมกนีโททรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 และ 4 จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงดังที่ได้อธิบายไป

### 2.3 คุณสมบัติทั่วไปของอุปกรณ์เซินเซอร์

การนำอุปกรณ์เซินเซอร์ไปใช้งานโดยทั่วๆ ไปนั้น มีเงื่อนไขในการใช้งานอย่างปกติเช่น ที่ อุณหภูมิ, ความชื้น, แรงดัน เพื่อให้สามารถนำเซนเซอร์ไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง เหมาะสม และ เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยในเซนเซอร์ทั่วๆ ไป ค่าเงื่อนไขการใช้งานอย่างปกติมีความหมายดังนี้

#### 2.3.1 ย่านวัด (Range)

เป็นการจำกัดค่าอินพุท และเอาต์พุทของเซนเซอร์ในการใช้งาน เช่นเซนเซอร์ที่ใช้วัดความดันตัวหนึ่งให้ความดันอยู่ในช่วง 0 ถึง 7 บาร์ โดยให้กระแสด้านเอาต์พุท 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 จะมีสอง ความหมาย ความหมายแรก หมายถึงสามารถวัดได้ละเอียด (sharp definition) อุปกรณ์วัดที่มีความละเอียดสูง หมายถึง สเกลที่แบ่งย่อยละเอียดมากทำให้สามารถอ่านค่าได้ละเอียด ในอีก ความหมายหนึ่งของคำว่าเที่ยงตรงก็คือค่าที่วัดได้เข้าใกล้กันเพียงใด ในความหมายหลังนี้จะหมายถึง

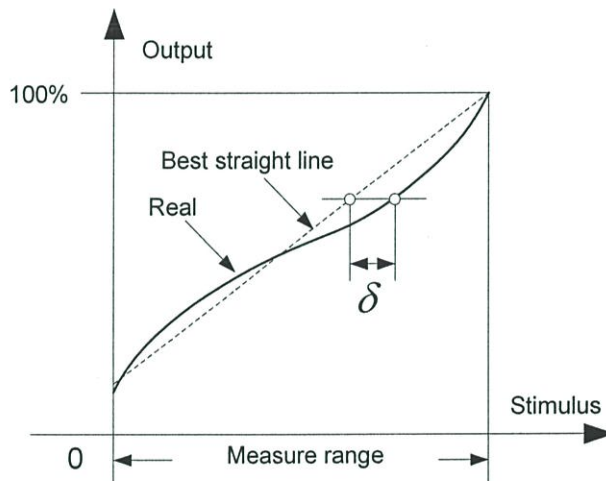
ความคงเส้นคงวา (consistency) หรือความสามารถซ้ำค่าเดิม (repeatability) ของผลการวัด อุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง หมายถึง ค่าที่ได้จากการวัดจะมีการกระจายน้อยกว่าอุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงต่ำ

### 2.3.4 ความไว (Sensitivity)

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

### 2.3.5 ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) หรือความแม่นยำ โดยความเป็นเชิงเส้นจะแสดงค่าที่วัดได้ว่าการวางตัวอย่างโรบนสเกลที่เป็นเชิงเส้น และเป็นสัดส่วน สเกลอาจจะเป็นเชิงเส้นอย่างมากแต่มีความเอียง, ความชัน หรือออฟเซ็ท จากค่าที่ถูกกำหนด ดังรูปที่ 2.13



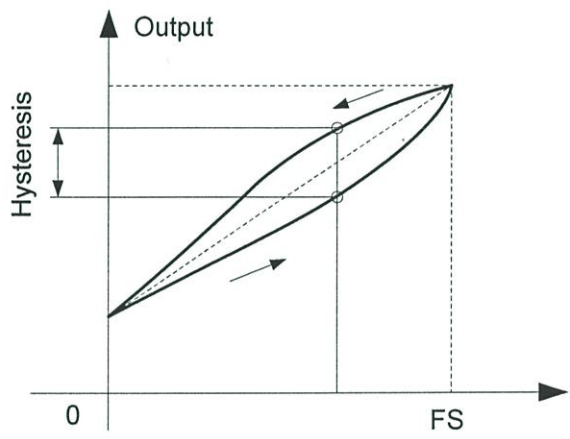
รูปที่ 2.13 แสดงความไม่เป็นเชิงเส้นของกราฟ

### 2.3.6 ความมีเสถียรภาพ (Stability)

ความมีเสถียรภาพของอุปกรณ์วัด หมายถึง ความสามารถในการให้สัญญาณเอาต์พุตเดิม เมื่อใช้วัดสัญญาณอินพุตที่คงที่แม้เวลาจะเปลี่ยนแปลงไป คำว่า การคลาดเคลื่อนมักถูกนำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าของเอาต์พุตอันเนื่องมาจากเหตุการณ์ดังกล่าว การคลาดเคลื่อนอาจจะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์เต็มย่านวัดก็ได้ คำว่า การคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์เป็นศูนย์ถูกนำมาใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏขึ้นที่เอาต์พุต เมื่ออินพุตมีค่าเป็นศูนย์

### 2.3.7 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

การที่อุปกรณ์วัดให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างไปจากค่าเดิมกล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงอาจมีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลงอย่างต่อเนื่อง ผลที่เกิดจากเหตุการณ์นี้เรียกว่า ฮิสเตอร์รีซิส ซึ่งค่าที่เกิดขึ้นนี้ถือว่าเป็นความผิดพลาด ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ฮิสเตอร์รีซิสสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างไปจากค่าเดิม

**2.3.8 การแยกชัด (Resolution or Discrimination)**

การแยกชัด บอกลถึง คุณภาพซึ่งแสดงถึงลักษณะจำเพาะของความสามารถของอุปกรณ์วัดในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเล็กๆ ของปริมาณที่ถูกวัด

**2.3.9 ออฟเซ็ท (Offset)**

ออฟเซ็ท เป็นค่าเอาต์พุตของเซนเซอร์ ที่ไม่ต้องการที่อุณหภูมิห้อง หรือที่สัญญาณอินพุตเป็นศูนย์ ในกรณีของอุปกรณ์ฮอลล์ค่าออฟเซ็ท หมายถึง ค่าแรงดันฮอลล์ในขณะที่สนามแม่เหล็กเท่ากับศูนย์

**2.3.10 ความเร็วในการตอบสนอง (Speed of Response)**

ความเร็วในการตอบสนอง แสดงถึงเวลาที่เอาต์พุตมีค่าอยู่ใน 63 % ของค่าสุดท้ายที่ทำการตอบสนองของอุปกรณ์เซนเซอร์ในการวัดทดลอง

## บทที่ 3

### โปรแกรม TCAD Sentaurus และการจำลองแบบ

ในเนื้อหาของบทนี้เราจะกล่าวถึงเครื่องมือที่สำคัญในการจำลองแบบการทำงาน และการจำลองแบบที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ โปรแกรม TCAD Sentaurus คือโปรแกรมหนึ่งที่ใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองการทำงาน เพื่อพัฒนาขั้นตอนกระบวนการสร้างหรือพัฒนาตัวอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำให้ดีที่สุด

ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้เราจึงใช้โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการดำเนินการทดสอบเพื่อศึกษาและพัฒนาแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

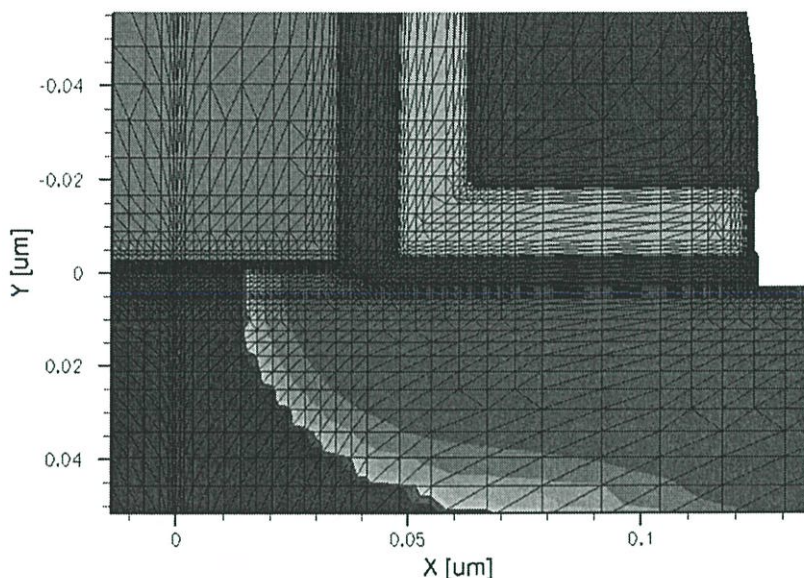
#### 3.1 บทนำ TCAD

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 ที่เกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์ เช่น โครงสร้าง, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ, สนามไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, การฉีดพาหะ และการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็ก TCAD ประกอบด้วยส่วนหลักๆ อยู่ 2 ส่วนได้แก่ การจำลองการทำงานที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนกระบวนการสร้าง (process simulation) และการจำลองการทำงานที่เกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (device simulation)

##### 3.1.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง (process simulation)

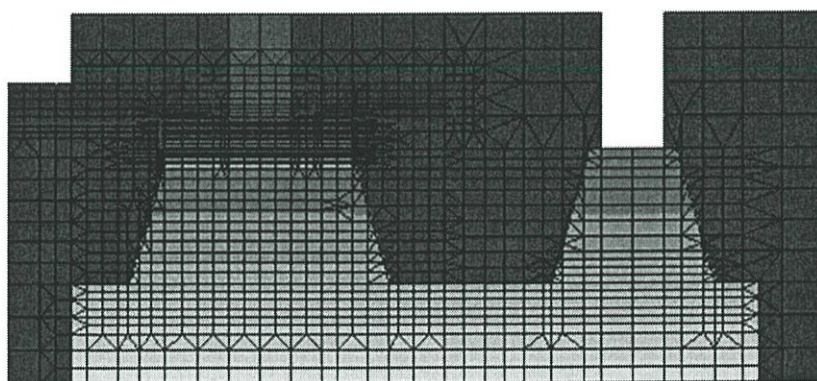
ในการจำลองแบบกระบวนการสร้างประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ เช่น etching, deposition, ion implantation, thermal annealing and oxidation ซึ่งเป็นการจำลองแบบที่อยู่บนพื้นฐานของสมการทางฟิสิกส์ ในส่วนของการจำลองแบบกระบวนการสร้างจะอยู่บนพื้นฐานของ เช่น ซิลิคอน จากนั้นส่วนของการจำลองแบบจะถูกเมส (mesh) หรือกริด (grid)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



รูปที่ 3.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง

### 3.1.2 การจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (device simulation)

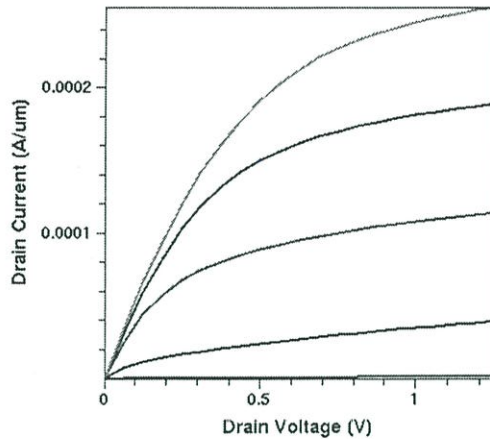
ในการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ใน TCAD เราสามารถที่จะจำลองแบบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น คุณสมบัติทางแสงหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ จะถูกเมส จากนั้นจะถูกแทนที่ด้วย finite-element structure ซึ่งแต่ละโนดของตัวอุปกรณ์จะมี คุณสมบัติทางด้านต่างๆที่รวมกันอยู่ เช่น ชนิดของวัสดุ (material type), ความเข้มข้นอะตอม สารเจือ (doping concentration), ความหนาแน่นกระแส (current density), สนามไฟฟ้า (electric field), อัตราการเกิดและการรวมตัวใหม่ (generation and recombination rates) และ คุณสมบัติอื่นๆ ซึ่งแต่ละโนดคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ จะถูกนำมาคำนวณซึ่งแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการจำลองแบบตัวอุปกรณ์โดยการจำลองการทำงานด้วย TCAD

ในการจำลองแบบตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำข้อไฟฟ้าจะถูกสร้างขึ้นและกำหนดเงื่อนไขขอบเขต เช่น แรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าเป็นต้น การจำลองแบบตัวอุปกรณ์ใน TCAD จะแก้ปัญหาสมการ ต่างๆมากมายที่เกี่ยวข้องกับการจำลองแบบ เช่น สมการปัวซอง (Poisson equation), สมการความ

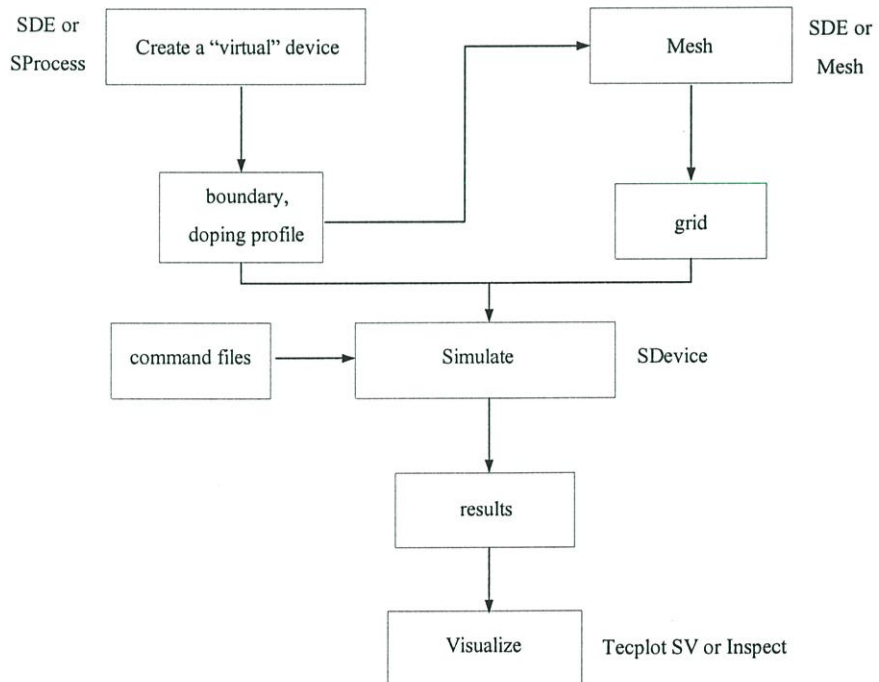
ต่อเนื่องของพาหะ (carrier continuity equation) และสมการอื่นๆ หลังจากการแก้สมการเหล่านี้ ผลของกระแสไฟฟ้าที่ได้จะถูกแสดงออกมาในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของการจำลองแบบการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

### 3.2 โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD

กระบวนการจำลองโดยทั่วไปจะเริ่มจากการสร้างโครงสร้างของอุปกรณ์ซึ่ง อาจจะมาจากการจำลองด้วย sprocess หรือ SDE ก็ได้ตามด้วยการสร้าง mesh ด้วย SDE หรือ Mesh หลังจากนั้นจึงนำโครงสร้างของอุปกรณ์และ mesh ที่ได้ไปจำลองหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป ผลลัพธ์ที่ได้สามารถแสดงได้โดย Tecplot SV และ Inspect โปรแกรมส่วนใหญ่จะถูกสั่งงานจาก command file (นามสกุล .cmd) ซึ่งเป็น text file ปกติที่สามารถสร้างและแก้ไขได้ด้วย text editor ทั่วไป แต่ชุดคำสั่งที่ใช้จะต่างออกไปในแต่ละโปรแกรมโดยรูปที่ 3.4 แสดงภาพรวมของการจำลองโดย TCAD



รูปที่ 3.4 ภาพรวมของการจำลองโดย TCAD

โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD มีส่วนประกอบ 6 ส่วนดังนี้

3.2.1 Sentaurus Workbench

3.2.2 Sentaurus Process

3.2.3 Sentaurus Structure Editor

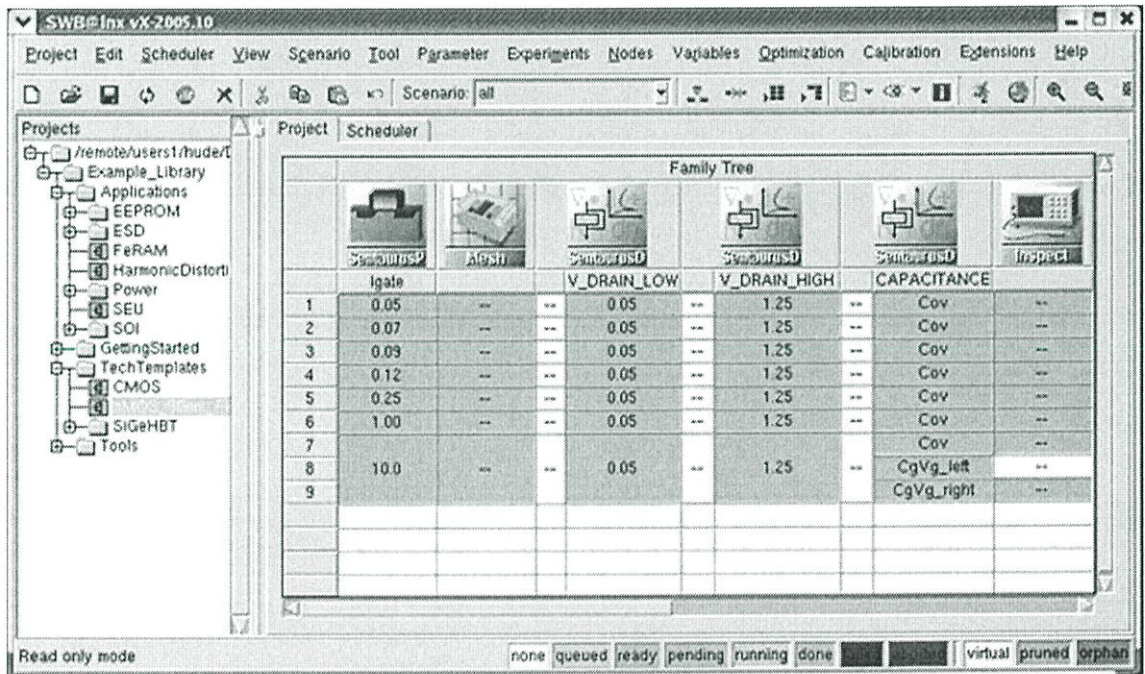
3.2.4 Sentaurus Device

3.2.5 Tecplot SV

3.2.6 Inspect

### 3.2.1 Sentaurus Workbench (SWB)

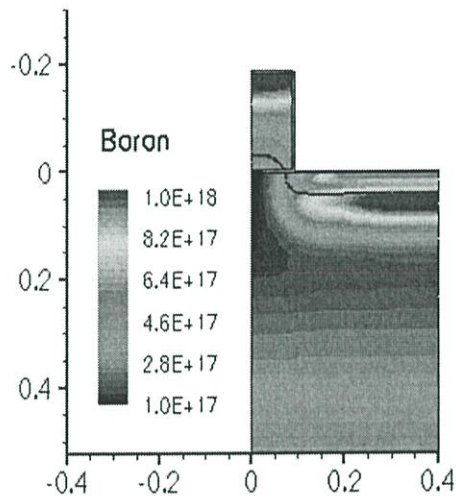
เป็น graphic user interface ที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของโปรแกรมต่างๆของ TCAD การสั่งงาน tool ต่างๆและการกำหนด Tool flow ก็จะทำผ่านโปรแกรมนี้เช่น การจำลองแบบกระบวนการสร้าง (Sentaurus Process), การจำลองแบบตัวอุปกรณ์ (Sentaurus Device) และเครื่องมือในการวิเคราะห์ (Inspect) เป็นต้น โดยโปรแกรม Sentaurus Workbench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



รูปที่ 3.5 หน้าต่างการทำงานของ Sentaurus Workbench

### 3.2.2 Sentaurus Process (sprocess)

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



รูปที่ 3.6 การยิงฝังประจุใน Sentaurus Process

### 3.2.3 Sentaurus Structure Editor (SDE)

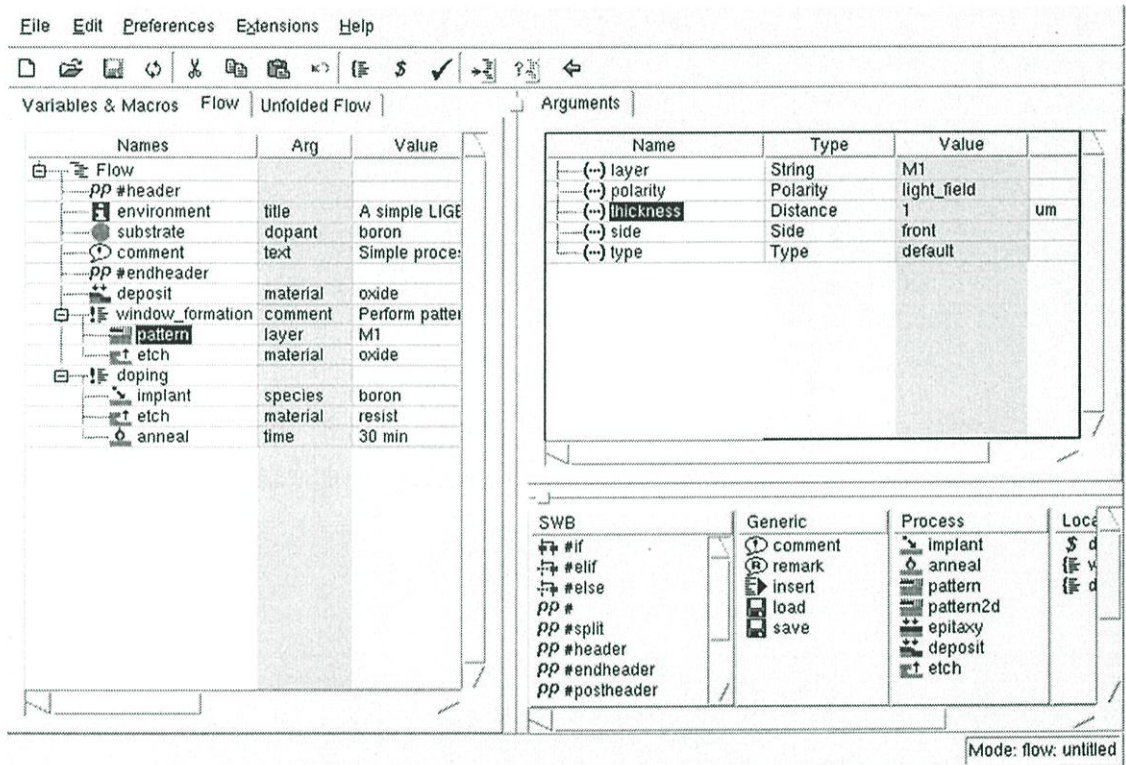
เป็นโปรแกรมสร้างโครงสร้างของอุปกรณ์โดยการเลียนแบบโครงสร้างจริงด้วยรูป ทรงเรขาคณิตและยังทำหน้าที่เป็นตัวกลางเรียกโปรแกรมสำหรับสร้าง mesh เพื่อใช้ในการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป Sentaurus Structure Editor เป็นส่วนของการออกแบบรูปร่างตัวอุปกรณ์ สารกึ่งตัวนำโดยสามารถที่จะทำการจำลองแบบรูปร่างและขนาดของตัวอุปกรณ์ทั้ง 2 มิติ และ 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

#### 3.2.3.1 Ligament

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

### - Ligament Flow Editor

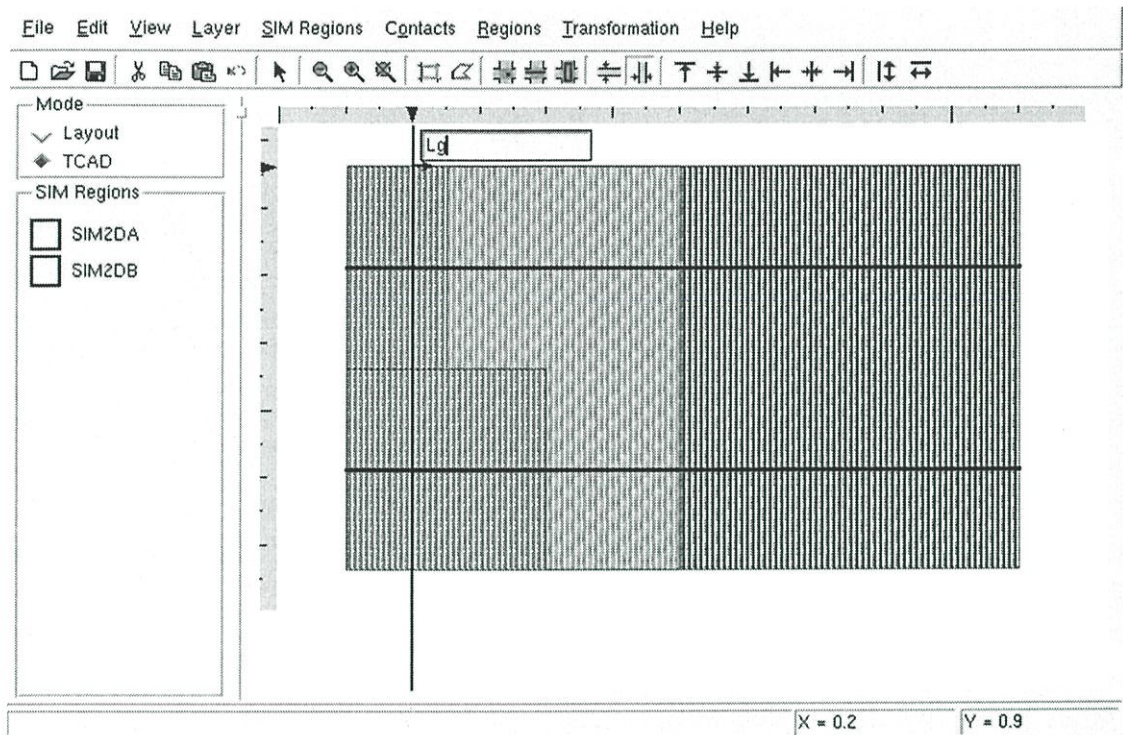
เป็นเครื่องมือใน Ligament ที่ช่วยในการกำหนดกระบวนการสร้างต่างๆของตัวอุปกรณ์ ทั้งหมดตามที่ได้ออกแบบไว้เช่น etching, deposition, ion implantation, thermal annealing และ oxidation โดยที่ในแต่ละกระบวนการผลิตเราสามารถที่จะกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆของกระบวนการได้ เช่น การกำหนดคราบ, ชนิด, ขนาดของแผ่นฐานรองซิลิคอน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



รูปที่ 3.7 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Flow Editor

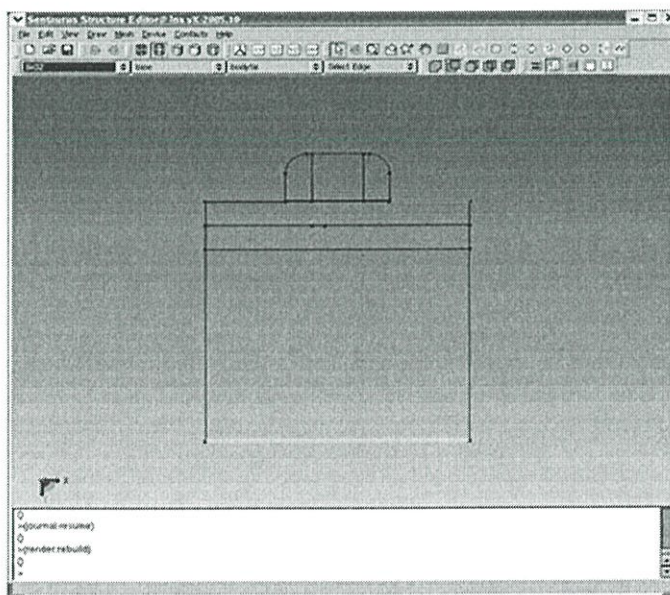
### - Ligament Layout Editor

เป็นเครื่องมือใน Ligament ที่ช่วยในการออกแบบส่วนประกอบต่างๆ ของตัวอุปกรณ์เสมือนกับการออกแบบกระจกต้นแบบ โดยที่เราสามารถกำหนดขอบเขตของการจำลองได้ว่าจะจำลองแบบ 2 มิติหรือ 3 มิติ รวมถึงการเปลี่ยนรูปร่างของอุปกรณ์ สามารถทำได้โดยไม่ต้องออกแบบใหม่เพียงใช้เส้นพารามิเตอร์ตัดผ่านส่วนที่ต้องการ และกำหนดค่าในหน้า Sentaurus Workbench รูปร่างของอุปกรณ์จะเปลี่ยนไปตามที่เราออกแบบรูปที่ 3.8 แสดงหน้าต่างการทำงานของ Ligament Layout Editor



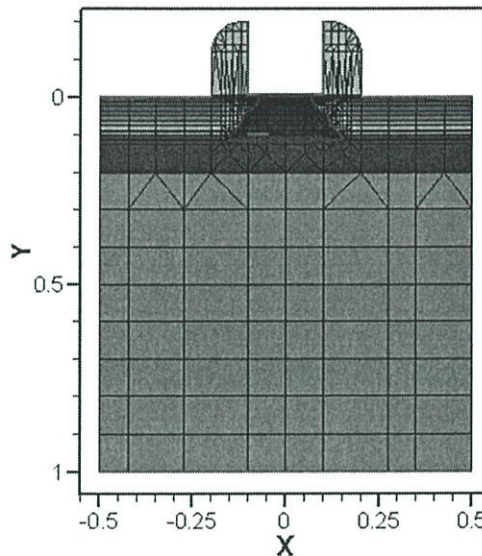
รูปที่ 3.8 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Layout Editor

ในส่วนการจำลองแบบทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ เราต้องกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์ เพื่อเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดกระแสและแรงดันจากภายนอกโดยหลังจากกำหนดหน้าสัมผัสแล้วจะแสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ตัวอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งส่วนหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดจะแสดงเส้นสีเกิดขึ้นตามคุณสมบัติหน้าสัมผัสที่ตั้งไว้



รูปที่ 3.9 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ในการจำลองการทำงาน

จากนั้นจะเป็นการสร้างเมส (mesh) ให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการจำลองการทำงานสามารถที่จะแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้ รูปที่ 3.10 แสดงการจำลองแบบตัวอุปกรณ์หลังจากการสร้างรูปร่างตัวอุปกรณ์และสร้างเมสเสร็จแล้ว



รูปที่ 3.10 การจำลองตัวอุปกรณ์หลังจากการสร้างเมส

หลังจากสร้างเมสจากนั้นก็จะเป็นส่วนของการกำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ ซึ่งอยู่ในส่วนของ Sentaurus Device

### 3.2.4 Sentaurus Device

Sentaurus Device เป็นหนึ่งในโปรแกรมที่ใช้จำลองแบบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical), ความร้อน (thermal) หรือแสง (optical) ในตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งในคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้จะประกอบด้วยโมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆมากมายที่เราสามารถที่จะนำมาใช้กับตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำหรือคุณสมบัติต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสภาพเงื่อนไขในการจำลองแบบ Sentaurus Device จึงถูกใช้ในการประเมินตัวอุปกรณ์และเพื่อความเข้าใจในการทำงานของตัวอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์ภายใต้คุณสมบัติต่างๆทำงานได้ดีที่สุดในส่วน 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

### 3.2.4.1 File

ในส่วน file จะเป็นการกำหนดไฟล์อินพุต และเอาต์พุต ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน เช่น

File {

\* Input Files

Grid = "nmos\_msh.tdr"

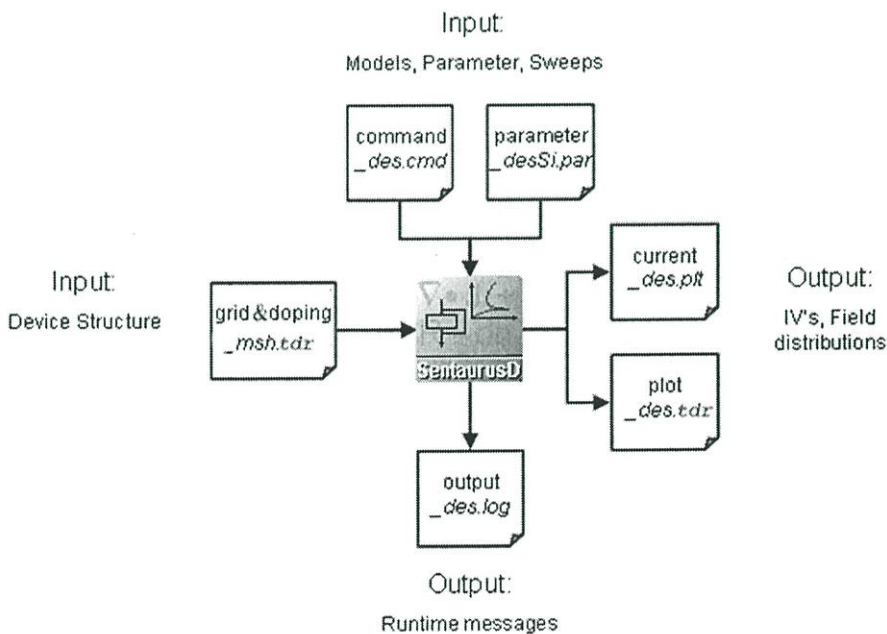
\* Output Files

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 แผนผังไฟล์อินพุตและเอาต์พุตใน Sentaurus Device

### 3.2.4.2 Electrode

ในส่วนของ Electrode เป็นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ให้กับหน้าสัมผัสไฟฟ้า ซึ่งแต่ละหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดอยู่ที่นี่จะต้องสอดคล้องกับชื่อหน้าสัมผัสที่ถูกกำหนดไว้ใน Sentaurus Structure Editor ในส่วนของ Electrode เราสามารถที่จะกำหนดคุณสมบัติของหน้าสัมผัสไฟฟ้าเช่น แรงดัน, กระแส, หน้าสัมผัสไฟฟ้าแบบช็อตกั, 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 โดยเราสามารถที่จะกำหนดในสิ่งที่เราต้องการทราบได้ เช่น ความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนหรือโฮล, ศักย์ไฟฟ้า, สนามไฟฟ้า, โมบิลิตี้, ความเร็วของพาหะ หรือ 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 }
```

หาคำตอบเริ่มต้นโดยแก้สมการ Poisson เพียงอย่างเดียว

```
Coupled { Poisson Electron Hole }
```

หาคำตอบเริ่มต้นของสมการ 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)

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

$$\text{realstep} = \text{step} \times (\text{vstop} - \text{vnow})$$

vstop คือค่าที่กำหนดใน Goal { ... }

vnow คือค่าปัจจุบันก่อนที่จะถึง Quasistationary { ... }

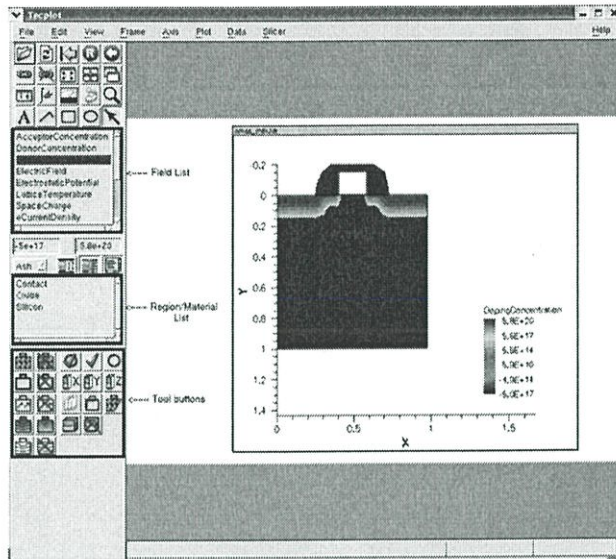
ตัวอย่างเช่นถ้าขณะนี้ที่ขั้ว anode มีศักย์ไฟฟ้า 0 โวลต์และต้องการ sweep ถึง 5 โวลต์ค่า

Initialstep, Maxstep และ Minstep ดังตัวอย่างด้านบนจะหมายถึง 0.05, 0.125 และ 5e-6 โวลต์

ตามลำดับส่วน Increment จะเป็นตัวคูณเพื่อเพิ่มค่า step ถ้า step ของ iteration รอบที่แล้วทำให้หาคำตอบของสมการได้ จุดประสงค์ของ Increment เพื่อลดระยะเวลาในการหาคำตอบในเงื่อนไขที่กำหนดใน Goal { ... }

### 3.2.5 Tecplot SV

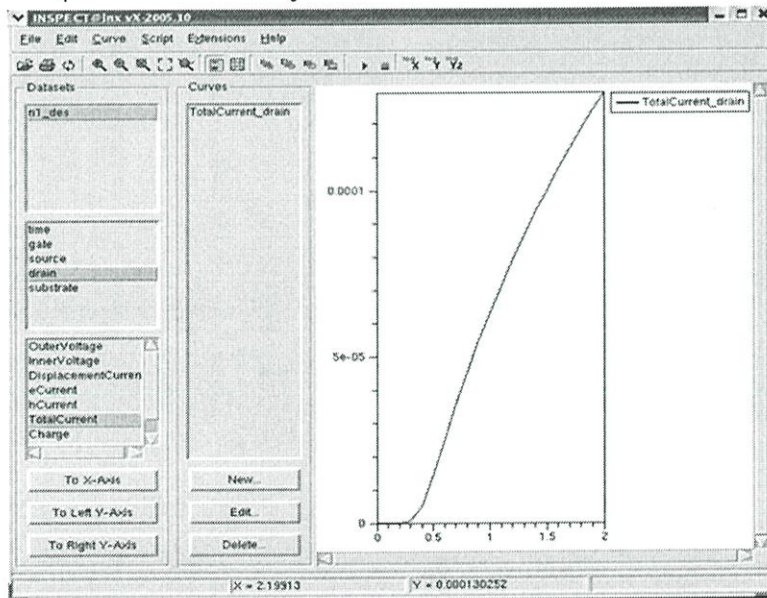
Tecplot SV เป็นโปรแกรมที่แสดงโครงสร้างของของอุปกรณ์ ทั้งแบบสองและสามมิติ ใช้แสดงข้อมูลที่ได้จากการจำลองการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในส่วนต่างๆที่ต้องการทราบซึ่งจะถูกกำหนดไว้แล้วในส่วน Plot โดย Tecplot SV จะแสดงการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เช่น ความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนหรือโฮล, ศักย์ไฟฟ้า, สนามไฟฟ้า, โมบิลิตี้, ความเร็วของพาหะ หรือ ความเข้มข้นสารเจือ เป็นต้น ซึ่งในส่วน Tecplot SV แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 โปรแกรมTecplot SV

### 3.2.6 Inspect

Inspect เป็นโปรแกรมที่แสดงและวิเคราะห์ผลการจำลองในรูปแบบของกราฟ XY เช่น การแสดงผล IdVd-curve, CV-curve, ปริมาณความหนาแน่นการแพร่, ปริมาณกระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ รูปที่ 3.13 แสดงหน้าต่างในส่วนของ Inspect



รูปที่ 3.13 หน้าต่างในส่วนของ Inspect

โดยในงานวิจัยชิ้นนี้เราใช้โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD ในส่วนของการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อจำลองกลไกการทำงานของแมกนีโททรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

### 3.3 การจำลองแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนโดย TCAD

ในการจำลองแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน โครงสร้างจะประกอบไปด้วยอิมิตเตอร์หนึ่งขั้วคอลเลคเตอร์และเบสอย่างละสี่ขั้ว โดยจะทำการไบอัสและให้สนามแม่เหล็กแก่ตัวอุปกรณ์ในแกน x, y, z เพื่อศึกษาผลของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแต่ละแกนว่าพาหะเคลื่อนที่อย่างไร และกระแสเอาท์พุทมีค่าเท่าไร โดยโครงสร้างจะมีส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการจำลองแบบ TCAD อยู่ 2 ส่วนได้แก่ 1. การออกแบบรูปร่างตัวอุปกรณ์ (Sentaurus Structure Editor) 2. การกำหนดโมเดลทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง (Sentaurus Device) ซึ่งในส่วนของตัวโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองแบบการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน จะแสดงในส่วนของภาคผนวกแต่ที่จะกล่าวถึงในส่วนนี้จะแสดงโครงสร้างที่ใช้ในการจำลองแบบในส่วนของ Sentaurus Structure Editor เท่านั้น ซึ่งในการจำลองแบบผู้ออกแบบต้องมีความรู้ความเข้าใจในเรื่องของกระบวนการสร้างก่อนจึงจะสามารถออกแบบได้

การจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน ด้วยโปรแกรมการจำลองแบบ TCAD ในส่วนของ Sentaurus Structure Editor โดยโครงสร้างประกอบไปด้วยอิมิตเตอร์หนึ่งขั้วคอลเลคเตอร์และเบสอย่างละสี่ขั้ว มีความกว้างอิมิตเตอร์ห้าไมโครเมตรและระยะระหว่างอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์มีขนาดสี่สิบบไมโครเมตร โดยทำการสร้างขั้วไฟฟ้าที่อิมิตเตอร์ เบสและคอลเลคเตอร์เพื่อเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกระแสภายนอก ซึ่งการจำลองแบบของโครงสร้างมีดังนี้

#### 3.3.1 การออกแบบ layout ของอุปกรณ์

โดยขั้นตอนแรกของการจำลองแบบการสร้าง เราจะทำการสร้าง layout ใน Ligament Layout เพื่อเป็นการจัดลำดับการทำส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์โดยในที่นี้ เราจะกำหนดให้ layer ที่ 1 คือส่วนของ อิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ layer ที่ 2 คือส่วนของเบสและสูดท่าย layer ที่ 3 คือส่วนของการทำชั้นโลหะ โดยชื่อ layer จะสัมพันธ์กับส่วนของ ligament flow ในช่วงการทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

หลังจากการทำ layer ชั้นต่างๆ เสร็จแล้ว ต่อไปเราจะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวอุปกรณ์ โดยชื่อของพารามิเตอร์เราสามารถตั้งได้เองตามที่ต้องการและพารามิเตอร์ที่ใช้มีดังนี้

Front ใช้กำหนดระยะห่างจากขอบด้านหน้าจนถึงขั้วของอุปกรณ์

Back ใช้กำหนดระยะห่างจากขอบด้านล่างจนถึงขั้วของอุปกรณ์

Left ใช้กำหนดระยะห่างจากขอบด้านซ้ายจนถึงขั้วของอุปกรณ์

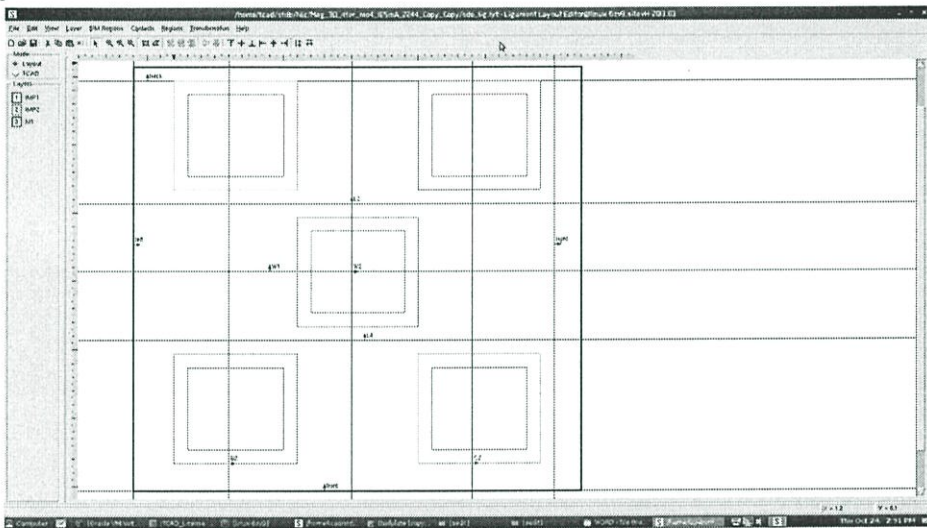
Right ใช้กำหนดระยะห่างจากขอบด้านขวาจนถึงขั้วของอุปกรณ์

W1 ใช้กำหนดความกว้างของอิมิตเตอร์

W2 ใช้กำหนดความกว้างของอิมิตเตอร์

- L1 ใช้กำหนดระยะการเบี่ยงเบนพาหะของขั้ว B1-C1
- L2 ใช้กำหนดระยะการเบี่ยงเบนพาหะของขั้ว B2-C2
- L3 ใช้กำหนดระยะการเบี่ยงเบนพาหะของขั้ว B3-C3
- L4 ใช้กำหนดระยะการเบี่ยงเบนพาหะของขั้ว B4-C4
- B1 ใช้กำหนดขนาดของขั้ว B1 และ C3
- C1 ใช้กำหนดขนาดของขั้ว C1 และ B3
- B2 ใช้กำหนดขนาดของขั้ว B2 และ C4
- C2 ใช้กำหนดขนาดของขั้ว C2 และ B4

หลังจากการกำหนดพารามิเตอร์แล้ว สุดท้ายเราจะทำการกำหนดขอบเขตในการจำลองแบบ 3 มิติ โดยจากรูป 3.14 กรอบสี่ดำเป็นการกำหนดบริเวณที่จะทำการจำลองในรูปแบบ 3 มิติ หลังจากกำหนดรูปแบบการจำลองแล้วก็เป็นอันเสร็จขั้นตอนของการออกแบบ layout ของอุปกรณ์



รูปที่ 3.14 layout ของอุปกรณ์จากการจำลองแบบ TCAD

### 3.3.2 การกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้าง

เมื่อทำการออกแบบ layout เสร็จเรียบร้อยแล้วต่อมาเราจะต้องกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้างของอุปกรณ์โดยใช้ ligament flow ช่วยในการกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้าง แสดงดังรูปที่

3.15 โดยการทำงานของ Ligament flow จะมีหัวข้อที่ใช้ในการสร้างดังต่อไปนี้

Environment คือการกำหนดชื่อของอุปกรณ์และรูปแบบของการจำลองว่าจะจำลองแบบ 2 มิติหรือแบบ 3 มิติ

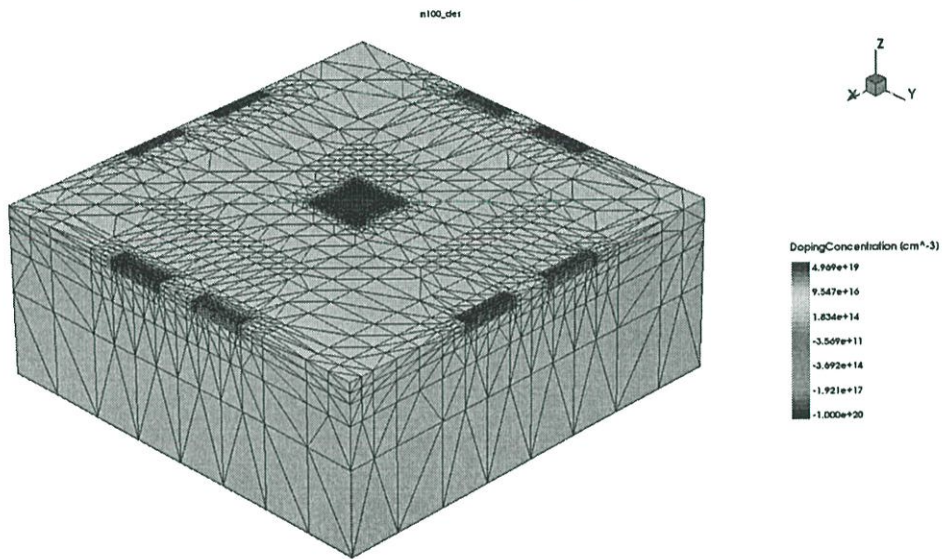
Substrate คือการกำหนดค่าต่างๆของฐานรองเช่น ชนิด ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ คาร์ซิสติวิตี เป็นต้น

Comment คือการบอกรายละเอียดต่างๆ ซึ่งจะพิมพ์ลงไปหรือไม่พิมพ์ลงไปก็ได้



### 3.3.3 การสร้าง mesh และกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้า

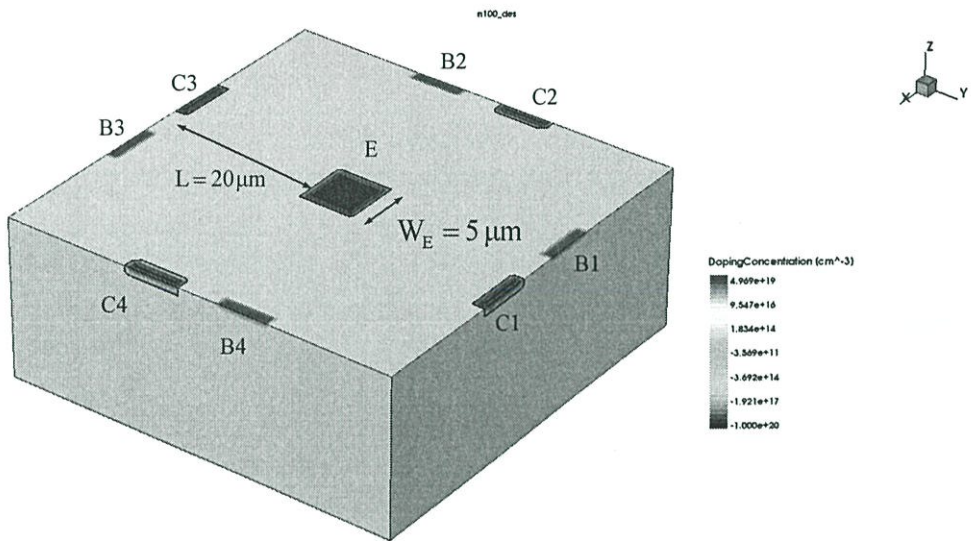
โดยเราจะทำการเขียนโปรแกรม mesh และ refinement box ในส่วนสำคัญเช่น บริเวณรอยต่อและบริเวณข้อต่างๆของอุปกรณ์ เพื่อสำหรับการคำนวณที่ออกมาจะได้ไม่ผิดพลาด หลังจากนั้นเราจะทำการกำหนดข้อข้อและบริเวณของอุปกรณ์เพื่อใช้สำหรับการคำนวณทางฟิสิกส์ต่อไป ซึ่งรายละเอียดต่างๆของการสร้าง mesh และหน้าสัมผัสไฟฟ้าจะอยู่ในส่วนของภาคผนวก เมื่อกำหนดรูปแบบโครงสร้างและขั้นตอนกระบวนการสร้างเสร็จแล้วต่อมาเราจะทำการสร้าง mesh ให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์สามารถแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทำการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าและข้อที่ต้องการจะพิจารณาแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การสร้าง mesh และการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้า

### 3.3.4 โครงสร้างในการจำลองแบบ

หลังจากกำหนดโครงสร้างใน Sentaurus Structure Editor ให้มีขนาดและวัสดุที่ต้องการเรียบร้อยแล้ว เราก็จะได้โครงสร้างของอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.17 โดยประกอบไปด้วยข้อ E C1 B1 C2 B2 C3 B3 C4 และ B4 โดยที่แถบสีจะแสดงความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของอุปกรณ์



รูปที่ 3.17 โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

## บทที่ 4 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนและเทคโนโลยีการผลิตที่เกี่ยวข้อง

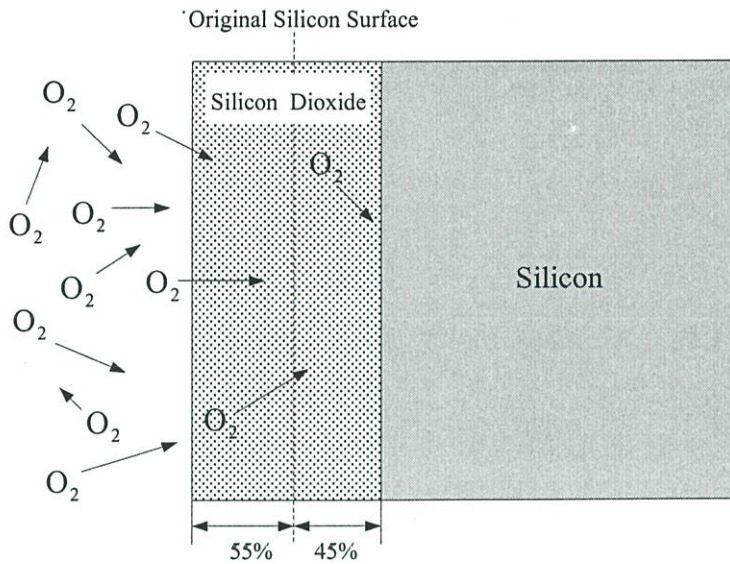
ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน การสร้างอาศัยเทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วย กระบวนการออกซิเดชัน, กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี, กระบวนการแพร์สารเจือ, การยิงฝังประจุและกระบวนการเมทัลไลเซชัน โดยทำการกระบวนการเหล่านี้เข้าไปซ้ำมาจนกระทั่งได้อุปกรณ์ขึ้นมา 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



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



รูปที่ 4.1 กระบวนการเกิดชั้นออกไซด์บนผิวของแผ่นซิลิคอน

กลไกของการเกิดออกไซด์ที่ผิวของแผ่นซิลิคอน เกิดเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีกันระหว่างโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนกับซิลิคอนดั้งที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยกระบวนการในการสร้างชั้นออกไซด์นี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ

#### 4.1.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

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

#### 4.1.2 การออกซิเดชันแบบเปียก (Wet Oxidation)

กระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก เป็นการทำปฏิกิริยากันทางเคมีระหว่างออกซิเจนกับซิลิคอน เพื่อให้เกิดเป็นออกไซด์เช่นเดียวกับกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง แต่แตกต่างกันตรงที่การออกซิเดชันแบบเปียก ออกซิเจนที่เกิดขึ้นมาจากโมเลกุลของน้ำ ดังแสดงในสมการที่ 4.2 คือที่อุณหภูมิสูงๆ โมเลกุลของน้ำสามารถแตกตัวเกิดเป็นก๊าซไฮโดรคลอไรด์ (HO) ซึ่งสามารถที่จะแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอนได้ออกไซด์ได้เร็วกว่าโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน ดังนั้นกระบวนการออกซิเดชันแบบเปียกจึงสามารถที่จะสร้างชั้นออกไซด์ได้รวดเร็วกว่ากระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง การออกซิเดชันแบบเปียกถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านต่างๆ เช่น การสร้างมาส์คออกไซด์, การสร้างชั้น LOCOS ออกไซด์

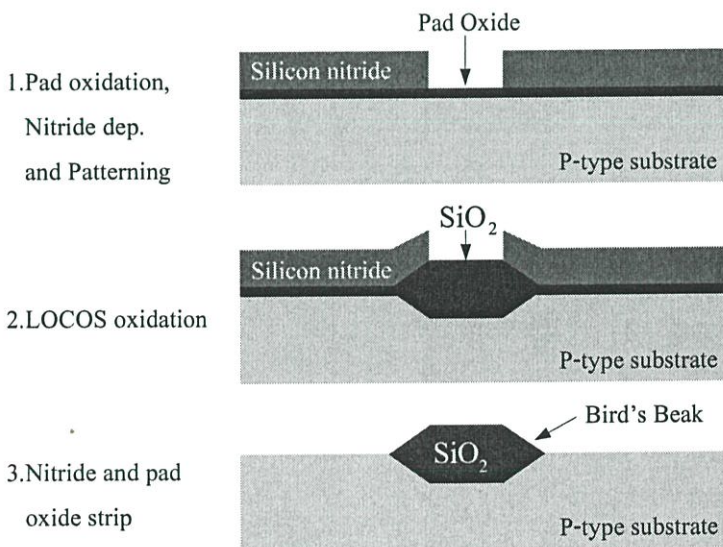
เป็นต้น ตารางที่ 4.1 แสดงการเกิดชั้นออกไซด์ขนาดความหนา 1000 อังสตรอม ที่เวลาแตกต่างกัน ของกระบวนการออกซิเดชันทั้งสองชนิด

ตารางที่ 4.1 กระบวนการออกซิเดชันที่แตกต่างกัน

Process	Temperature	Film thickness	Oxidation time
Dry oxidation	1000 °C	1000 Å	~ 10 hours
Wet oxidation	1000 °C	1000 Å	~ 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”

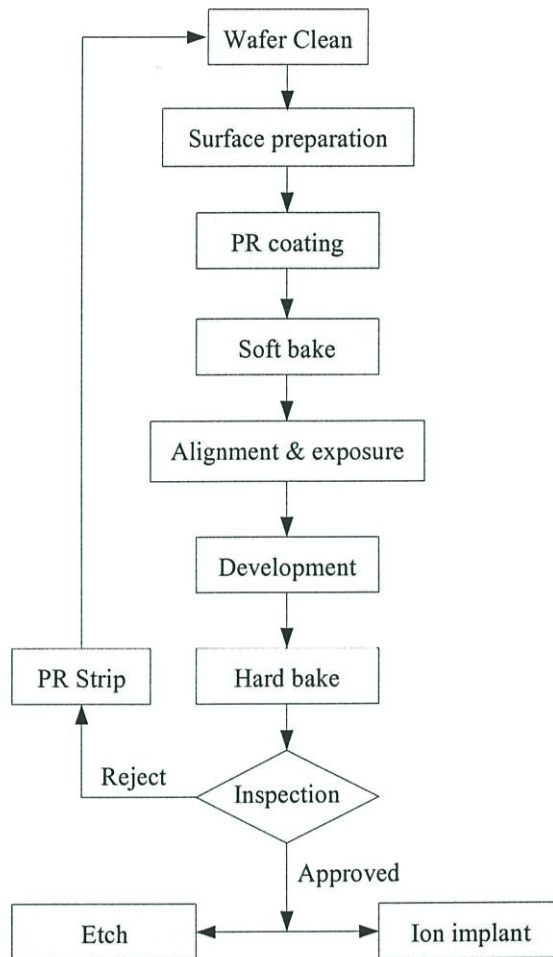


รูปที่ 4.2 การสร้างชั้นออกไซด์เฉพาะที่จากกระบวนการออกซิเดชัน

## 4.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเป็นกระบวนการของการถ่ายแบบ (Patterning) จากกระจกต้นแบบไปยังน้ำยาไวแสงที่เคลือบอยู่บนผิวของแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งเมื่อฉายแสงลงบนผิวของแผ่นเวเฟอร์ จะทำให้เกิดลวดลายต่างๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีเริ่มแรกถูกใช้ในอุตสาหกรรมทางการผลิตแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ต่อมาถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตทรานซิสเตอร์และแผ่นวงจรรวม (Integrated circuit) สำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีถือเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญอย่างมากต่ออุตสาหกรรมการผลิต IC โดยจะทำหน้าที่ในการสร้างลวดลายต่างๆ ลงบนแผ่นเวเฟอร์ ก่อนทำการกัด (etching), การยิงฝังประจุ (ion implantation) หรือการแพร่สารเจือ (Diffusion) เพื่อทำเป็นชั้นต่างๆ ต่อไป

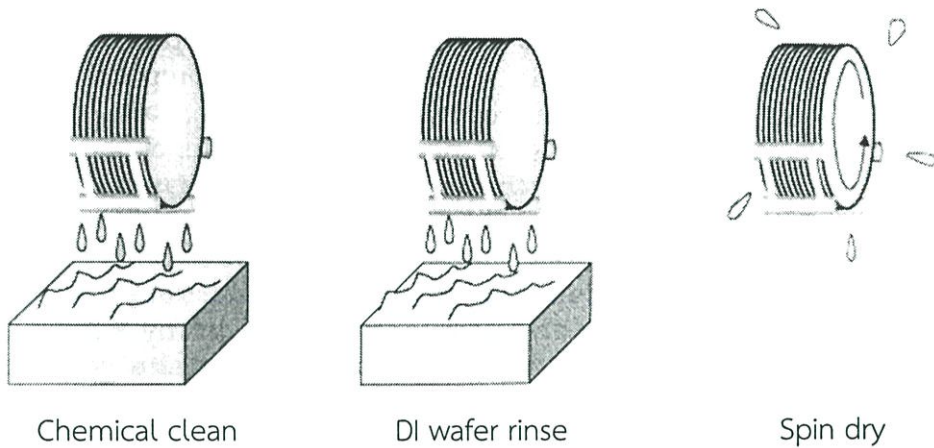
โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้ เริ่มต้นจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์อยู่ที่ผิวด้านบน ไปเคลือบผิวหน้าด้านด้วยน้ำยาไวแสง จากนั้นนำไปฉายแสงโดยผ่านกระจกต้นแบบ ที่เรียกว่าโฟโตมาสก์ (photo mask) ซึ่งทำหน้าที่เป็นต้นแบบ มีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจก ซึ่งได้มาจากการออกแบบ (design) แสงที่ฉายผ่านกระจกโฟโตมาสก์ จะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสง จึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณที่ไม่ถูกแสง ปฏิกิริยาเคมี-แสงที่เกิดขึ้น จะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่นผลึกนี้ไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป บางส่วนจะคงเหลือค้าง อยู่บนผิวของซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยาไวแสง ชั้นของน้ำยาไวแสงที่เหลือปกคลุมอยู่บนผิวซิลิคอนไดออกไซด์ จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณนี้ ถูกกัด หรือเอตซิงค์ ด้วย “สารตัวกัด” หรือเอตซันท์ (etchant) เช่น กรดกัดแก้ว (HF) เป็นต้น ซึ่งในขั้นตอนของการเอตซิงค์ แผ่นผลึกจะถูกนำไปทำปฏิกิริยาเคมีกับสารเคมีที่เป็นสารตัวกัด หรือ เอตซันท์ ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะสามารถกัดหรือละลายชั้นของออกไซด์ออกไปได้ ในที่สุด หลังจากนั้น เมื่อชั้นของน้ำยาไวแสงถูกลอกออก ก็จะปรากฏภาพ หรือลวดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้น โดยมีลักษณะเป็นลวดลายเหมือนกับลวดลายบนกระจกโฟโตมาสก์ การเกิดภาพลวดลายได้ ก็เพราะชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนถูกกัดออกไปนั่นเอง ในรูปที่ 4.3 เป็นไดอะแกรมแสดงกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี



รูปที่ 4.3 ไตอะแกรมแสดงกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

#### 4.2.1 ทำความสะอาดผิวหน้า (Wafer clean)

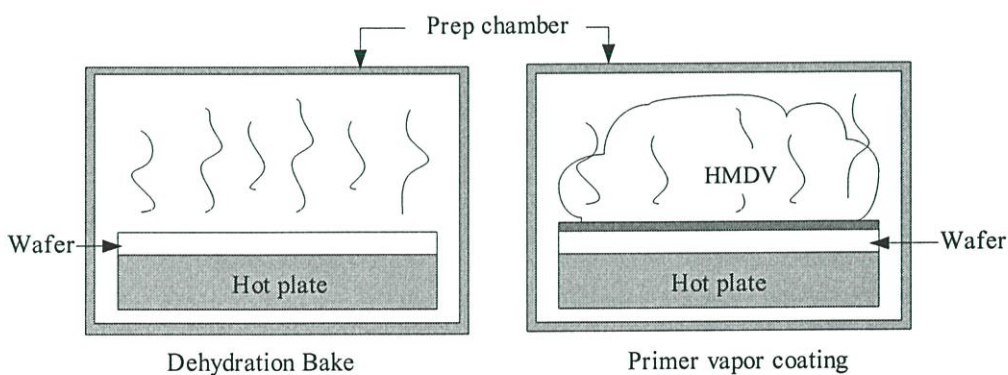
ก่อนที่จะเริ่มต้นกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และกระบวนการผลิตอื่นๆ จำเป็นที่จะต้องมีการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์เสียก่อน เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมต่างๆ เช่น คราบไขมันที่ติดมาหรือคราบฝุ่นละอองต่างๆ โดยทั่วไปแล้วจะใช้กระบวนการทางเคมีในการกำจัดสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้ออกไป ซึ่งหลังจากที่ทำความสะอาดด้วยสารเคมีแล้ว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



รูปที่ 4.4 แสดงขั้นตอนกระบวนการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์

#### 4.2.2 การเตรียมผิวหน้า (Surface preparation)

โดยปกติแล้วน้ำยาไวแสงจะถูกนำมาใช้งาน หรือถูกเคลือบบนผิวของวัสดุชนิดต่างๆ หลายชนิด แล้วแต่งานที่ต้องการทำ เช่น ชั้นออกไซด์ ชั้นซิลิคอน ชั้นอะลูมิเนียม เป็นต้น ดังนั้นการเตรียมผิวหน้าของแผ่นผลึกก่อนที่จะทำการเคลือบน้ำยาไวแสงบนผิวสารต่างชนิดกัน จะมีวิธีการเตรียมผิวที่ต่างกัน โดยผิววัสดุที่ใช้กันมากที่สุดก็คือ ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งการเตรียมผิวหน้าของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทำได้โดยเริ่มจากการกำจัดความชื้น หรือโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในชั้นออกไซด์ออกไป เพราะผิวของชั้นออกไซด์มีความสามารถในการดูดซึมน้ำหรือความชื้นจากอากาศได้ดี การกำจัดความชื้นทำได้โดยการอบ ซึ่งเรียกว่า Pre bake หรือ dehydration bake ที่อุณหภูมิ ราว 200-250 °C นาน 30 นาที ภายหลังจากอบ ถ้าหากนำออกมาทิ้งไว้นานเกินกว่า 1 ชั่วโมง ชั้นของออกไซด์จะดูดซึมน้ำความชื้นเข้าไปอีก จำเป็นต้องทำการอบใหม่ ดังนั้นเมื่ออบเสร็จแล้วควรดำเนินการเคลือบ



รูปที่ 4.5 กระบวนการเตรียมผิวหน้าก่อนเคลือบน้ำยาไวแสง

น้ำยาไวแสงทันที นอกจากนี้ ก่อนทำการเคลือบน้ำยาไวแสง อาจใช้สารพิเศษที่เรียกว่า Hexamethyldisilazane (HMDS,  $(\text{CH}_3)_3\text{SiNH}_2\text{Si}(\text{CH}_3)_2$ ) ฉีดพ่น หรืออบไอระเหย เพื่อช่วยให้ผิวสามารถยึดติดกับน้ำยาไวแสงได้ดียิ่งขึ้น เพราะสารนี้จะช่วยกำจัดโมเลกุลของน้ำออกจากชั้นผิวของออกไซด์ ดังแสดงใน

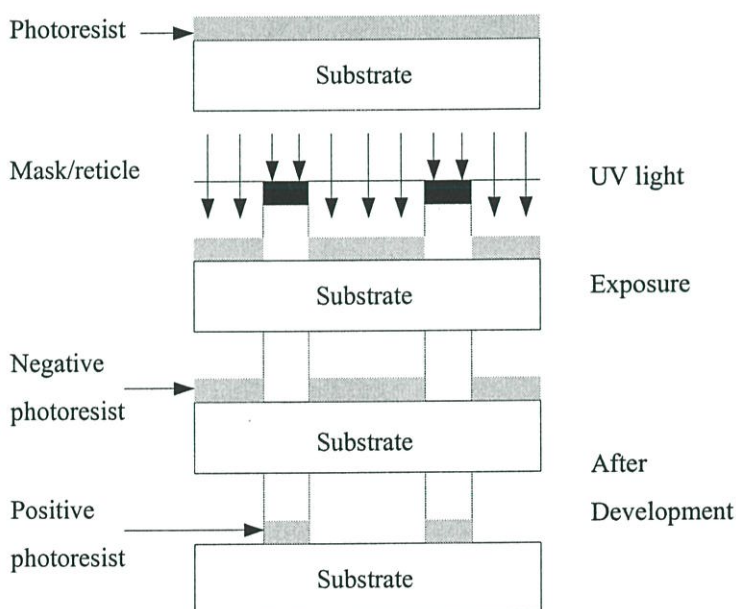
รูปที่ 4.5 โดยทั่วไปแล้วในเครื่องสปินเนอร์ จะมีหัวฉีดสเปรย์ของสาร HMDS แล้วปั่น หรือหมุนให้แห้ง จากนั้นจึงจะทำการเคลือบน้ำยาไวแสงต่อไป

### 4.2.3 การเคลือบน้ำยาไวแสง (Photoresist Coating)

การเคลือบน้ำยาไวแสงเป็นขั้นตอนการเคลือบชั้นฟิล์มบางของน้ำยาไวแสงที่ผิวด้านบนของแผ่นเวเฟอร์ โดยน้ำยาไวแสงจะมีด้วยกันสองแบบคือ แบบ Positive และแบบ Negative ซึ่งมีวิธีการใช้ที่แตกต่างกัน ในขณะที่กระบวนการเคลือบน้ำยาไวแสงก็จะมีด้วยกันหลายวิธี แล้วแต่ความเหมาะสมของการนำไปใช้งาน ซึ่งอาจสรุปได้ดังต่อไปนี้

#### 4.2.3.1 น้ำยาไวแสง (Photoresist)

น้ำยาไวแสงเป็นสารโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติทางแสงคือ สามารถเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีได้เมื่อได้รับแสงตกกระทบ ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในด้าน การสร้างลวดลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรือใช้ในอุตสาหกรรม IC สำหรับถ่ายแบบจากมาสก์ที่ออกแบบไว้ไปยังแผ่นเวเฟอร์



รูปที่ 4.6 แสดงคุณสมบัติทางแสงที่แตกต่างกันของน้ำยาไวแสงสองชนิด

โดยน้ำยาไวแสงสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามคุณสมบัติในการตอบสนองต่อแสง คือ 1.Negative photoresist น้ำยาไวแสงชนิดนี้ หลังจากกระบวนการฉายแสงและการ develop แล้ว จะได้ลวดลายตรงกับข้ามกับต้นแบบ นั่นคือส่วนที่ไม่ถูกแสงจะถูกกัดออก เหลือไว้เฉพาะบริเวณที่ถูกแสงเท่านั้น และ 2.Positive photoresist เป็นน้ำยาไวแสงที่หลังจากการฉายแสงและการ develop แล้ว จะได้ลวดลายแบบเดียวกับกับมาสก์หรือว่าต้นแบบ นั่นคือส่วนที่ได้รับแสงจะถูกกัดออก ในขณะที่ส่วนที่ไม่ได้รับแสงจะคงเหลืออยู่ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งคุณสมบัติที่แตกต่างกันของน้ำยาไว

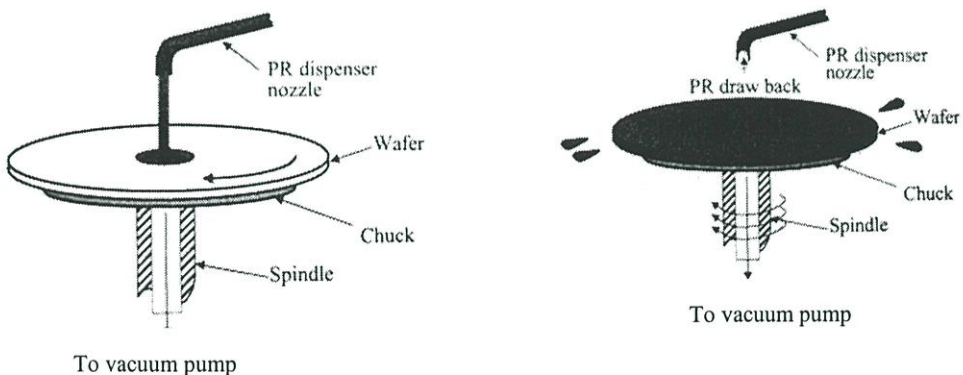
แสงทั้งสองชนิด โดยอุตสาหกรรมทางด้านเซมิคอนดักเตอร์ในปัจจุบันจะนิยมใช้น้ำยาไวแสงชนิด Positive เนื่องจากมีความละเอียดสูงกว่าชนิด Negative

#### 4.2.3.2 วิธีการเคลือบ (Coating)

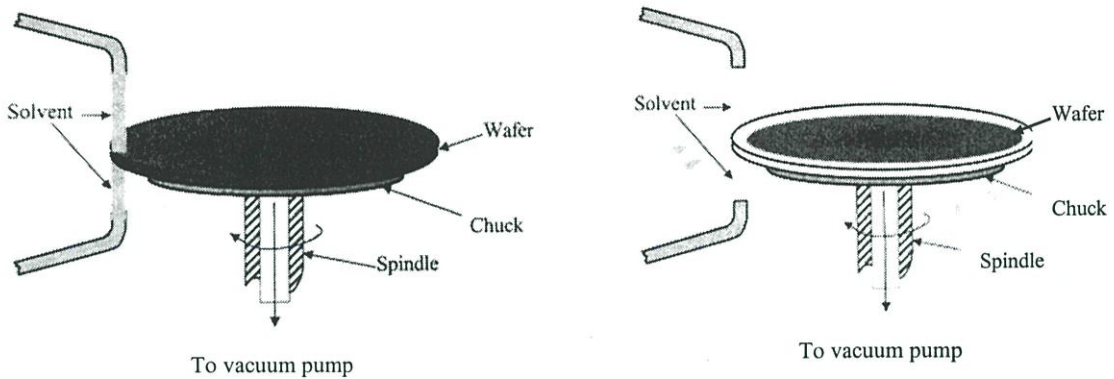
การเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกหรือแผ่นเวเฟอร์ ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ หรือชั้นวัสดุอื่น ๆ อยู่ที่ผิวด้านบนนั้น สามารถกระทำได้หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสมหรือประเภทของงานที่ใช้ ซึ่งอาจสรุปได้ดังนี้

- แบบสปินเนอร์ (Spinner coating)

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



รูปที่ 4.7 การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีการสปินเนอร์



รูปที่ 4.8 การลอกฟิล์มที่ขอบของแผ่นผลึกหลังจากการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยการสปินเนอร์

- แบบสเปรย์ (Spray coating)

วิธีการเคลือบน้ำยาไวแสงแบบสเปรย์ น้ำยาไวแสงจะถูกฉีด หรือพ่นออกมาให้เป็นละออง แล้วตกลงไปเกาะกับผิวหน้าของแผ่นผลึก และยึดเกี่ยวกันเป็นแผ่นฟิล์มบาง คล้ายกับการพ่นสีสเปรย์ ซึ่งใช้ง่าย และสะดวกแต่เหมาะกับเฉพาะงานบางประเภท ซึ่งการควบคุมความหนาของฟิล์มที่ทำได้ยาก ปกติจะใช้ในบางขั้นตอนซึ่งไม่สำคัญ เช่น ใช้เคลือบสารไวแสงเพื่อป้องกัน ชั้นออกไซด์ ด้านล่างของแผ่นผลึก

- แบบใช้ลูกกลิ้ง (Roller coating)

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

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

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

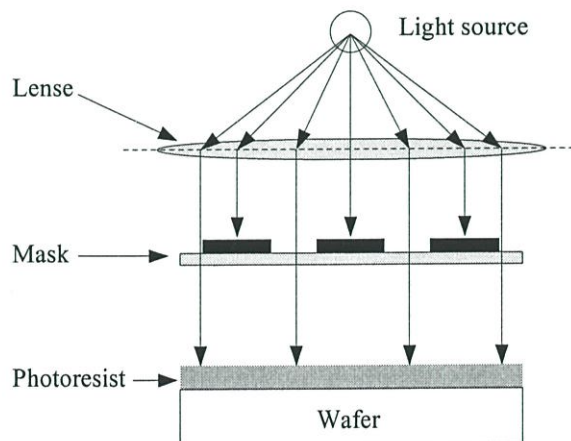
เข้าไปด้านใน วิธีการนี้อาจทำให้ผิวหน้าของชั้นน้ำยาไวแสงได้รับความร้อนก่อน ที่อาจเป็นสาเหตุของการแข็งตัวและป้องกันไม่ให้ความชื้นที่อยู่ด้านในออกมาภายนอกได้ซึ่งถือเป็นข้อเสีย และไม่เหมาะที่จะนำไปใช้สำหรับงานที่มีความละเอียดสูง สำหรับในสายการผลิตวงจรรวมในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมอบแผ่นผลึกทีละแผ่น โดยเคลื่อนอยู่บนสายพาน ซึ่งถูกฉายด้วยรังสีอินฟราเรด วิธีการนี้ฐานรองที่เป็นแผ่นผลึกซิลิคอนจะได้รับความร้อนก่อนเพราะซิลิคอนมีคุณสมบัติดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ดีกว่าชั้นของน้ำยาไวแสง ดังนั้นความร้อนจึงเริ่มจากฐานรองแผ่นผลึกซิลิคอน แล้วขึ้นไปสู่ชั้นน้ำยาไวแสง ซึ่งทำให้สามารถไล่ความชื้นออกมาได้โดยไม่เกิดปัญหา วิธีให้ความร้อนเช่นนี้ เรียกว่า “Bottom up heating” นอกจากนี้อาจใช้วิธีการแบบแผ่นร้อน (Hot Plate) โดยนำแผ่นซิลิคอนไปวางบนแผ่นร้อนหรืออาจใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนก็สามารถทำได้เช่นกัน

#### 4.2.5 การปรับมาส์คและการฉายแสง (Alignment and Exposure)

ขั้นตอนการปรับมาส์คและการฉายแสงเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ซึ่งกระบวนการนี้จะทำหน้าที่ในการถ่ายแบบจากกระจกต้นแบบ ไปยังผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ตามที่ได้ออกแบบไว้

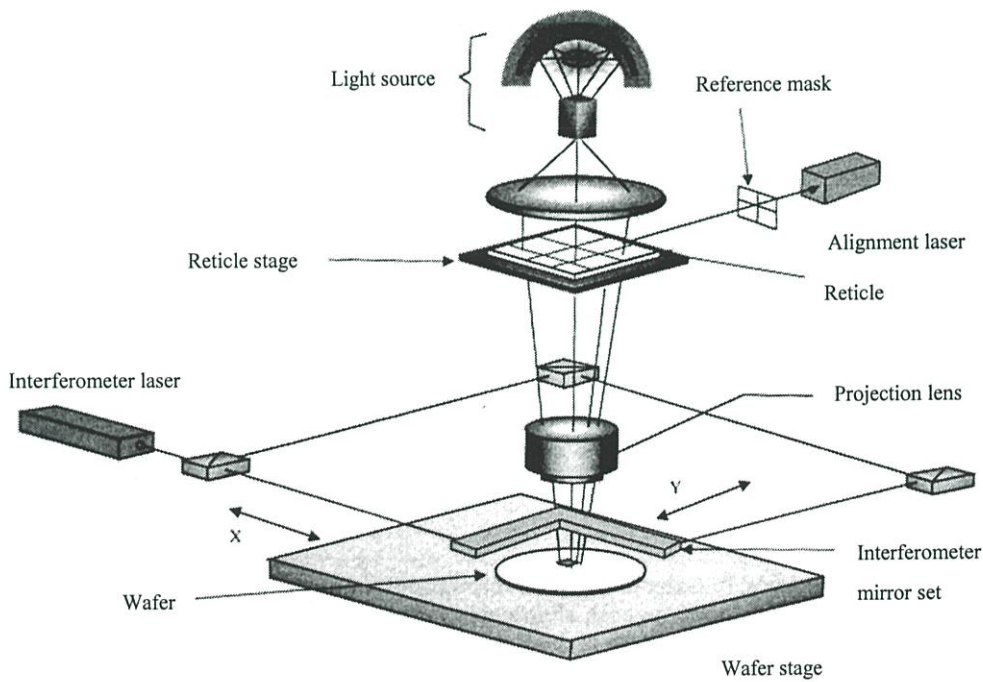
##### 4.2.5.1 การปรับมาส์ค

วิธีการฉายแสงผ่านกระจกโฟโต้มาส์ค โดยปกติจะถูกวางสัมผัส(Contact) ลงไปบนแผ่นเวเฟอร์ที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่เป็นกระจกโฟโต้มาส์คชิ้นแรก หรือมาส์คที่ 1 สามารถทำได้โดยไม่ต้องมีการปรับช้อนมาส์ค (Mask alignment) ทั้งนี้เนื่องจาก ยังไม่ได้มีการสร้างส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจรรวม บนแผ่นเวเฟอร์เลย ดังในรูปที่ 4.9 แต่ในกรณีที่แผ่นเวเฟอร์นั้น ได้ผ่านการสร้างส่วนของวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไป จำเป็นที่จะต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่ง หรือบริเวณที่ถูกต้อง เพื่อให้ได้โครงสร้างของวงจรรวมตามที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 4.9 แสดงกระบวนการถ่ายแบบจากมาส์คไปยังผิวของแผ่นเวเฟอร์

ดังนั้นการใช้กระจกโฟโตมาส์คตั้งแต่มาส์ค 2 เป็นต้นไป ก่อนการฉายแสงจำเป็นจะต้องมีการปรับตำแหน่งมาส์ค เพื่อให้แบบลวดลายบนกระจกมาส์ค ซ้อนกับแบบลวดลายที่มีอยู่บนแผ่น เวเฟอร์ อย่างถูกต้องเสียก่อน เพื่อให้สามารถเปิดชั้นของออกไซด์ตรงตำแหน่งที่ต้องการ ทำให้ได้โครงสร้างของวงจรรวมเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นในการปรับซ็อนจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วย ซึ่งเรียกว่า “ตัวปรับซ็อนมาส์ค” ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆ คือแผ่นเวเฟอร์จะถูกวางและติดไว้กับแท่นเลื่อน (X-Y-Z table) ซึ่งสามารถปรับให้เลื่อนในแนวนอน (X) แนวตั้งฉาก (Y) และแนวสูง (Z) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 การปรับเลื่อนนี้ทำได้ด้วยทั้งแนว X, Y, Z นอกจากนี้ยังสามารถปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบ โดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ส่วนตำแหน่งของกระจกโฟโตมาส์คจะถูกยึดให้อยู่หนึ่งเหนือแผ่นเวเฟอร์เล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ ทำให้สามารถสังเกตเห็นภาพลวดลายที่ปรากฏทั้งบนแผ่นเวเฟอร์และบนโฟโตมาส์ค พร้อมทั้งทำการปรับเลื่อนฐานที่ยึดแผ่นเวเฟอร์ไว้ทั้งแกน X, Y และมุม  $\theta$  จนกระทั่งภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นเวเฟอร์และบนโฟโตมาส์คซ้อนกันตรงตำแหน่งที่ต้องการ จากนั้นทำการปรับให้ตำแหน่งของแผ่นเลื่อนสูงขึ้นในแนวแกน Z จนแนบสนิท กับกระจกโฟโตมาส์ค ในกรณีที่ภาพลวดลายมีขนาดใหญ่พอที่จะสังเกตได้ การปรับซ็อนภาพนี้จะสามารถทำได้โดยสังเกตจากลวดลายของวงจรรวมโดยตรง แต่โดยทั่วไปภาพลวดลายของวงจรรวมจะมีขนาดเล็กมาก



รูปที่ 4.10 แสดงกระบวนการปรับมาส์คและการฉายแสงด้วยระบบสตีปเปอร์ (Stepper)

เนื่องจากการยากที่จะทำการปรับซ็อนโดยสังเกตจากภาพลวดลายของวงจรรวมดังนั้น ในทางปฏิบัติเพื่อให้การปรับซ็อนทำได้ง่ายขึ้น จึงมีการใช้ภาพลวดลาย ซึ่งออกแบบขึ้นเพื่อใช้สำหรับ

การปรับซ็อนมาร์สค์โดยเฉพาะ และเรียกว่า “เครื่องหมายปรับซ็อน” ซึ่งอาจจะเป็นภาพจัตุรัสในกล่องสี่เหลี่ยม (square in box), กากบาทในสี่เหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมในกากบาท เช่น ภาพลวดลายบนแผ่นผลึกของ “เครื่องหมายปรับซ็อน” เป็นรูปจัตุรัส และภาพลวดลายบนกระจกมาร์สค์ เป็นรูปกล่องสี่เหลี่ยม เป็นต้น การปรับซ็อนทำได้โดยการปรับเลือนแผ่นผลึก บนแท่นให้อยู่ในตำแหน่งที่ได้ภาพจัตุรัสเข้าไปซ็อนอยู่พอดี ภายในภาพกล่องสี่เหลี่ยม ในตำแหน่งนี้ภาพลวดลายของวงจรรวมบนแผ่นผลึก และบนกระจกโฟโต้มาร์สค์ จะอยู่ตรงตำแหน่งที่ถูกต้องทุกประการ ถ้าหากการปรับซ็อนตำแหน่งผิดพลาด โครงสร้างของวงจรรวมก็จะไม่ถูกต้องและเกิดการเสียหายได้ ดังนั้นขั้นตอนของการปรับซ็อนจึงเป็นเรื่องสำคัญมาก

#### 4.2.5.2 การฉายแสง (Exposure)

เมื่อทำการปรับซ็อนภาพระหว่างกระจกโฟโต้มาร์สค์ และแผ่นเวเฟอร์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือ การฉายแสง ผ่านกระจกโฟโต้มาร์สค์ เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ที่ชั้นของน้ำยาไวแสง โดยปกติน้ำยาไวแสงที่ใช้ในเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวม จะมีความไวต่อแสงที่มีความยาวคลื่น  $\lambda$  ในช่วง 300-500 นาโนเมตร ซึ่งก็คือ แสงที่เรามองเห็นเป็นสีม่วงและสีน้ำเงินนั่นเอง ดังนั้นในห้องปฏิบัติการ เทคนิคโฟโตลิโธกราฟีจึงสามารถใช้แสงสีเหลืองได้ เพราะแสงสีเหลืองมีความยาวคลื่นมากกว่า 500 nm ซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสง แต่ถ้าเป็นฟิล์มถ้ำยรูปจะต้องใช้แสงในท้องที่มีสีแดงเท่านั้น แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้มาจากหลอดไอปรอท (Mercury lamp) ซึ่งหลอดนี้จะให้เส้นสเปกตรัมที่มีความเข้มสูง ที่ความยาวคลื่นราว 365, 405 และ 436 นาโนเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยทั่วไปโครงสร้างที่มีลวดลายขนาดประมาณ 0.50  $\mu\text{m}$  และ 0.35  $\mu\text{m}$  จะใช้หลอดไอปรอทชนิด G - line และ I -line ที่ให้ความยาวคลื่นอ่อนเท่ากับ 436 nm และ 365 nm ตามลำดับ สำหรับขนาดโครงสร้างอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 4.2 ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง (Exposure Light Source) ชนิดต่างๆ

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

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

#### 4.2.6 การล้างน้ำยาไวแสง (Development)

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

### 4.3 การกัด (Etching)

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

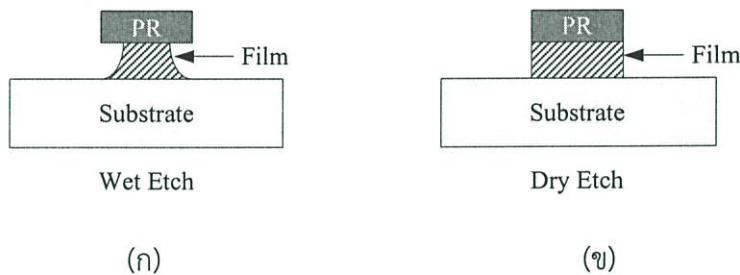
#### 4.3.1 การกัดแบบเปียก (Wet Etch)

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



### 4.3.2 การกัดแบบแห้ง (Dry Etch)

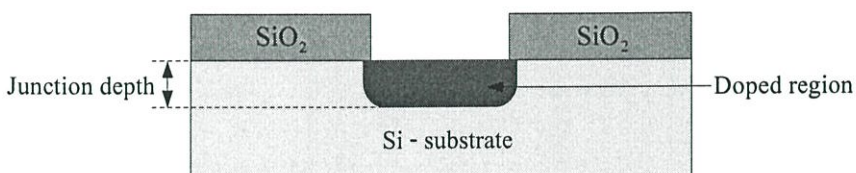
การกัดแบบแห้งหรือกระบวนการกัดโดยใช้พลาสมา (Plasma Etch) เป็นวิธีการกัดโดยการใช้อิออนของแก๊ส (Ionized gas) หรือที่เรียกว่า “พลาสมา” เข้าไปทำลายพันธะเคมีของสารที่เคลือบอยู่ที่ผิวของแผ่นเวเฟอร์ โดยอนุภาคไอออนของพลาสมาอาจเข้าไปรวมตัวกับสารที่เคลือบอยู่เกิดเป็นสารใหม่แล้วหลุดออกไป การกัดแบบแห้งนี้สามารถกัดลวดลายได้คมชัดและเล็กกว่าการกัดแบบเปียกมาก ซึ่งเหมาะสมกับงานที่มีลวดลายขนาดเล็กหรือมีความละเอียดสูง และไม่มีปัญหาเรื่องการกัดลึกเข้าไปใต้ชั้นป้องกัน ดังในรูปที่ 4.11(ข) แต่ข้อเสียของการกัดแบบคือ กัดได้ช้ากว่าการกัดแบบเปียก และมีการใช้พลังงานที่ค่อนข้างสูง 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 และสามารถแพร่สารเจือพร้อมกันได้คราวละหลายๆที่สำคัญคือเป็นวิธีที่ประหยัด กระบวนการแพร่สารเจือสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามชนิดของการแพร่สารเจือคือ การแพร่สารเจือชนิดพี และ การแพร่สารเจือชนิดเอ็น โดยหลังจากที่ทำการแพร่สารเจือเรียบร้อยแล้วนั้น จะทำให้ได้สารเจือตรงบริเวณที่เป็นช่องเปิด ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการแพร่สารเจือ

#### 4.4.1 การแพร่สารเจือชนิดพี

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

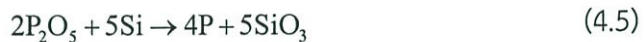
เทคนิคการแพร่สารเจือโดยใช้โบรอนอาจสามารถทำได้ 3 แบบคือ อะตอมของโบรอนสามารถสังเคราะห์มาได้จากสารประกอบ 3 ชนิดในสถานะของแข็งคือโบรอนไตรออกไซด์ ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) หรือในสถานะของเหลวคือ โบรอนไตรโบรไมด์ ( $\text{BBr}_3$ ) และในสถานะของก๊าซคือ โบรอนไตรคลอไรด์ ( $\text{BCl}_3$ ) ซึ่งไม่ว่าจะเป็นสารประกอบชนิดใดก็ตาม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



จากนั้นโบรอนจะแพร่เข้าไปในเนื้อของผลึกซิลิคอน แต่ในงานทางด้านอุตสาหกรรมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนิยมใช้สารประกอบ โบรอนไนไตรด์ (BN) เป็นต้นกำเนิดของโบรอน เนื่องจากมีความสะดวกในการแพร่มากที่สุด โดยที่สารประกอบโบรอนไนไตรด์ที่เป็นของแข็งจะทำให้อยู่ในลักษณะเป็นแผ่นบางๆ คล้ายแผ่นผลึกซิลิคอนก่อนทำการแพร่แผ่นโบรอนไนไตรด์จะถูกทำให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานได้ คือจะถูกนำไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้บริเวณผิวของแผ่นโบรอนไนไตรด์กลายเป็นโบรอนไตรออกไซด์ ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) เสียก่อนซึ่งเรียกว่าการ Activate จากนั้นจึงนำแผ่นผลึกซิลิคอนมาวางใกล้ๆ กับแผ่นโบรอนไนไตรด์นี้แล้วจึงทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว 1100 °C (ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน)

#### 4.4.2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น

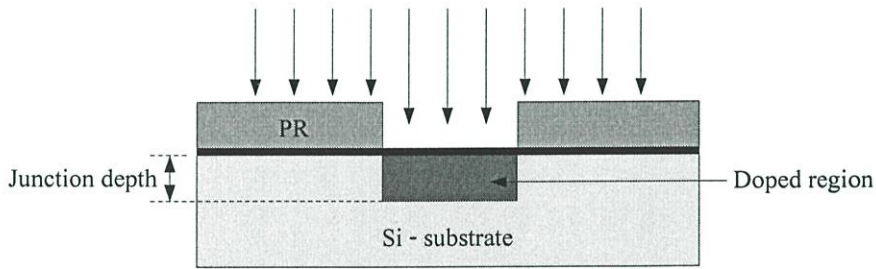
ธาตุที่สามารถนำมาใช้เป็นสารเจือชนิดเอ็น (n-type) ได้แก่ ฟอสฟอรัส (Phosphorus), พลวง (Antimony) และสารหนู (Arsenic) การจะเลือกธาตุที่จะนำไปเป็นสารเจือทำได้โดยไม่จำกัด ซึ่งต่างจากกรณี สารเจือชนิด p กล่าวคือ ธาตุเหล่านี้ใช้งานได้ดี ในแต่ละลำดับชั้น ตัวอย่างเช่น พลวง และสารหนู ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำมักใช้เป็นสารเจือชนิด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



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

#### 4.5 การยิงฝังประจุ (Ion implantation)

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



รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการยิงฝังประจุ

#### 4.5.1 การยิงฝังประจุสารเจือชนิดพี (P-type)

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

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

#### 4.5.2 การยิงฝังประจุสารเจือชนิดเอ็น (N-type)

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

สำหรับกระบวนการในการสารเจือทั้งสองวิธีที่ได้กล่าวมาคือ กระบวนการแพร่และการยิงฝังประจุ สามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติในด้านต่างๆ ได้ดังในตารางดังต่อไปนี้

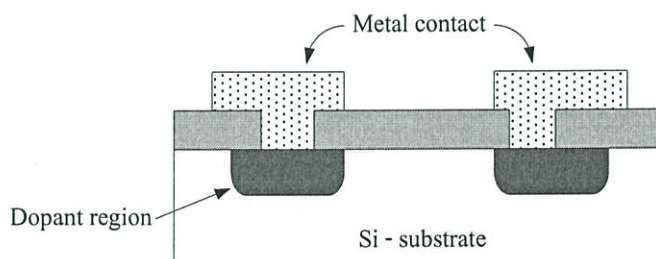
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติในด้านต่างๆ ระหว่างกระบวนการแพร่สารเจือกับการยิงฝังประจุ

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

#### 4.6 การสร้างชั้นโลหะ (Metallization)

การสร้างชั้นโลหะหรือ การเมทัลไลเซชัน (Metallization) เป็นขั้นตอนของการสร้างชั้นของโลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่อขาอุปกรณ์เข้ากับขั้วไฟฟ้าภายนอกเข้า โดยโลหะที่ถูกนำมาใช้จะมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น อะลูมิเนียม (Aluminum), ไททาเนียม (Titanium) ทองแดง (Copper), หรือโลหะผสมระหว่าง อะลูมิเนียมกับทองแดง (Al-Cu) เป็นต้น และอาจจะเลือกใช้โพลีซิลิคอน (Polysilicon) หรือสารประกอบของซิลิคอนกับธาตุอื่นอย่าง ไททาเนียมซิลิไซด์ (TiSi<sub>2</sub>) ที่มีความต้านไฟฟ้าน้อยกว่าโพลีซิลิคอน โดยการเลือกใช้โลหะสำหรับการทำเป็นขั้วโลหะนั้น แล้วแต่คุณสมบัติและความเหมาะสมต่องานที่นำไปใช้

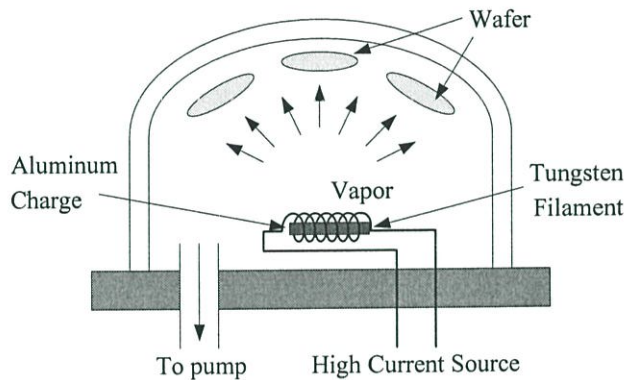
สำหรับโลหะที่นิยมนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) ซึ่งเป็นโลหะที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีและมีราคาถูก จึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับทำเป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 การต่อชั้นโลหะสำหรับเชื่อมต่อตัวอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก

กระบวนการเคลือบอะลูมิเนียมโดยทำให้อะลูมิเนียมกลายเป็นไอด้วยความร้อน และทำให้ไอระเหยไปเกาะอยู่บนผิวหน้าของแผ่นเรียกว่ากระบวนการระเหยในสุญญากาศ(evaporation) ซึ่งจะมีบทบาทสำคัญในกระบวนการเมทัลไลเซชันในการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ การเปลี่ยน

อะลูมิเนียมให้กลายเป็นไอภายใต้ความดันต่ำโดยระบบต้องการความดันประมาณ  $10^{-6}$  Torr เป็นการทำให้ออกซิเจนและความชื้นเหลือน้อยที่สุด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะมีผลให้อะลูมิเนียมมีความต้านทานสูงได้ สำหรับกระบวนการระเหยในสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 4.15 โดยเส้นลวดถูกทำให้ร้อนจนละลายตลอดขณะที่ระบบอยู่ภายใต้ความดันต่ำ หลังจากนั้นอุณหภูมิของอะลูมิเนียมจะระเหยแพร่ไปเคลือบบนแผ่นผลึก ทำให้มีชั้นอะลูมิเนียมบางๆเคลือบบนแผ่นผลึก การควบคุมความหนาของโลหะนั้นจะมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าซึ่งควบคุมโดยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยการเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15 กระบวนการระเหยในสุญญากาศ (Evaporation)

ของกระแสไฟฟ้าทำให้อัตราการเคลือบแผ่น (Deposition rate) สูงขึ้นตามไปด้วย แต่สิ่งสำคัญของระบบการผลิตนี้คือเป็นการยากในการควบคุมความหนาของฟิล์มซึ่งในกระบวนการสร้าง VLSI และ ULSI จะไม่ใช่กระบวนการนี้เนื่องจากกระบวนการระเหยในสุญญากาศนี้จะทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_T$ ) มอสเฟตสูงขึ้นและทำให้วงจรรวมถูกลดความน่าเชื่อถือโดยระบบนี้จะใช้กระแสไฟฟ้าสูงมาก อยู่ที่ประมาณ 10 Amp ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ โดยโลหะที่ทำการสร้างบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะมีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์นั้นๆ ซึ่งคุณสมบัติของโลหะที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้

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

#### 4.7 กระบวนการสร้างแมกนีโททรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

ในกระบวนการสร้างตัวอุปกรณ์ ต้องทำการออกแบบกระจกต้นแบบก่อนเพื่อใช้เป็นแบบสำหรับขั้นตอนการถ่ายแบบลงบนชิ้นงาน หลังจากนั้นเริ่มกระบวนการสร้างตัวอุปกรณ์โดยใช้กระบวนการที่กล่าวมาข้างต้น

##### 4.7.1 การออกแบบกระจกต้นแบบ (Mask Design)

ในการออกแบบกระจกต้นแบบ ใช้โปรแกรม L-edit ในการออกแบบ โดยกระบวนการสร้างแมกนีโททรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน ใช้กระจกต้นแบบ 2 ชั้น มีทั้งหมด 6 ชั้น ดังต่อไปนี้คือ

ชั้นที่ 1 แอคทีฟ (Layer 1:Active) แสดงดังรูปที่ 4.16(ก) ใช้กำหนดพื้นที่ของตัวอุปกรณ์ที่จะทำการสร้าง

ชั้นที่ 2 เอ็น ซีเล็ค (Layer 2:N-Select) แสดงดังรูปที่ 4.16(ข) ใช้สำหรับการสร้างเบสขึ้นจากกระบวนการยิงฝั้งประจุพอสฟอรัส

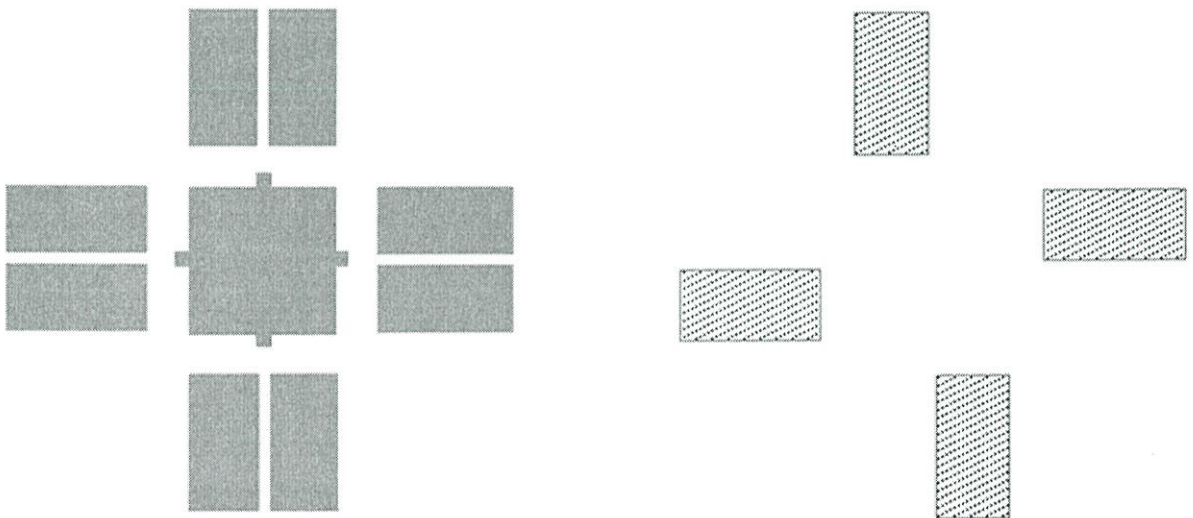
ชั้นที่ 3 พี ซีเล็ค (Layer 3:P-Select) แสดงดังรูปที่ 4.16(ค) ใช้สำหรับการสร้างอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ด้วยกระบวนการยิงฝั้งประจุโบรอน

ชั้นที่ 4 คอนแทค (Layer 4:Contact) แสดงดังรูปที่ 4.16(ง) ใช้ในการเปิดช่องเพื่อทำการเชื่อมต่อกับชั้นโลหะ

ชั้นที่ 5 เมทัล (Layer 5:Metal) แสดงดังรูปที่ 4.16(จ) ใช้สำหรับการสร้างชั้นโลหะ เช่น อะลูมิเนียม (Al), ไททาเนียม (Ti), ไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) เป็นต้น

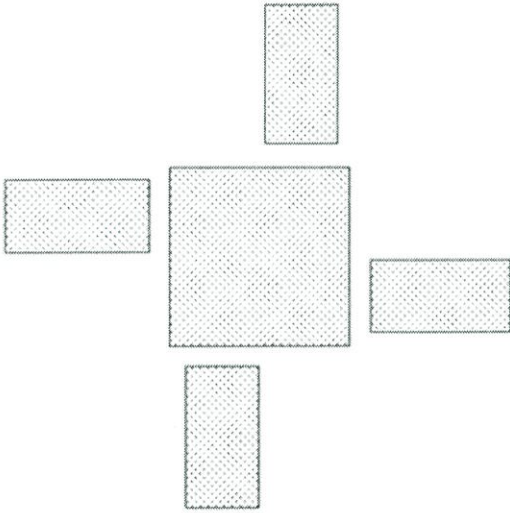
ชั้นที่ 6 แพด (Layer 6:Pad) แสดงดังรูปที่ 4.16(ฉ) ใช้สำหรับสร้างพื้นที่ที่เป็นจุดเชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้าภายนอก

โดยในรูปที่ 4.17 แสดงโครงสร้างทั้งหมดของตัวแมกนีโททรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนและในรูปที่ 4.18 แสดงกระจกต้นแบบที่ใช้

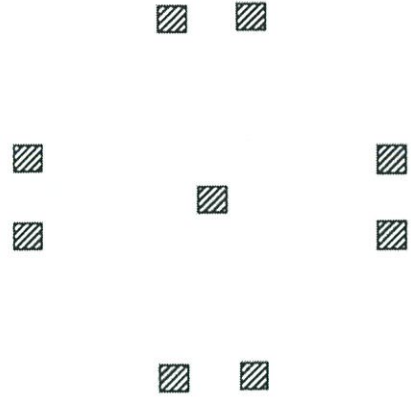


(ก) ชั้นที่ 1 แอคทีฟ (Active)

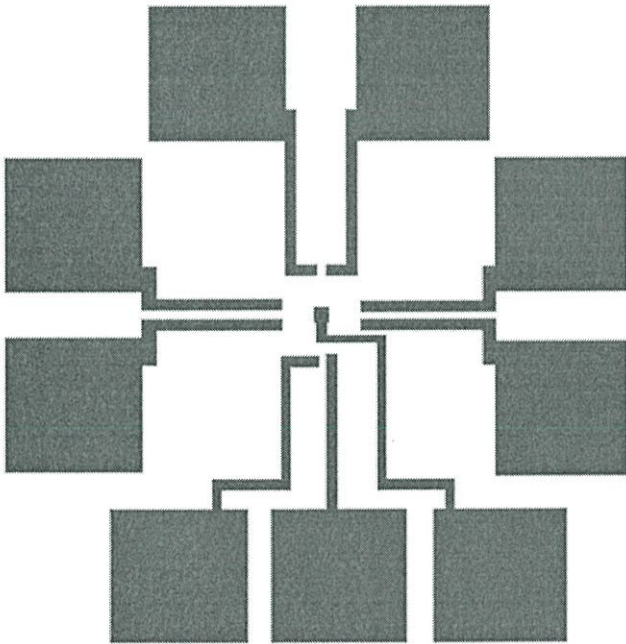
(ข) ชั้นที่ 2 เอ็น ซีเล็ค (N-Select)



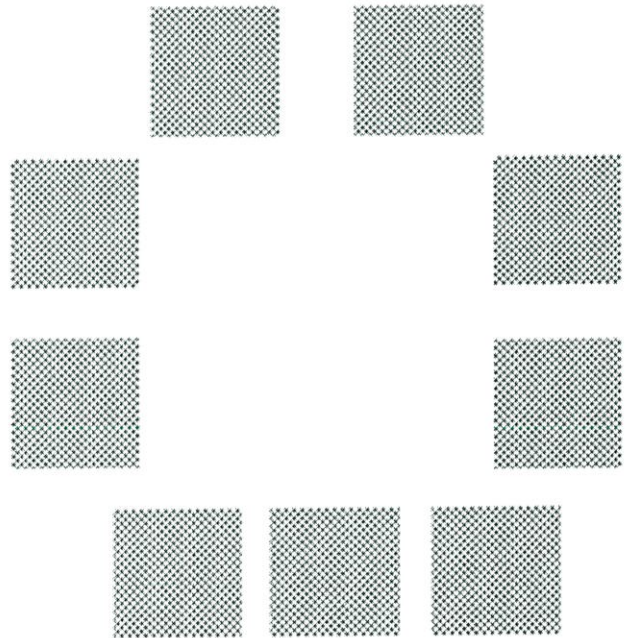
(ค) ชั้นที่ 3 พี ซีเล็ค (P-Select)



(ง) ชั้นที่ 4 คอนแทค (Contact)

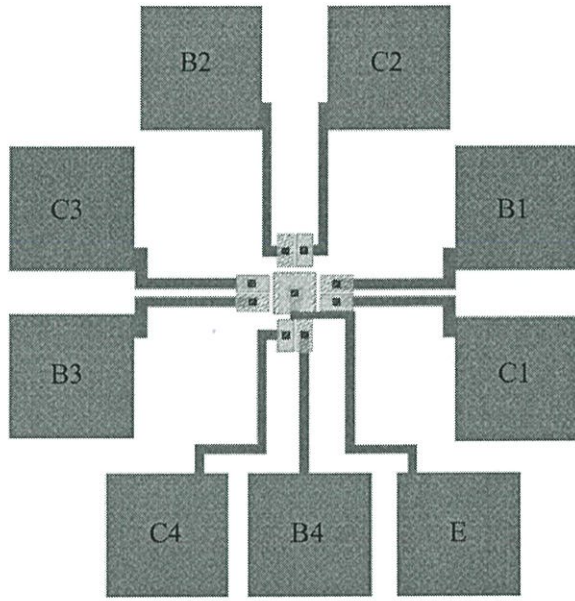


(จ) ชั้นที่ 5 เมทัล (Metal)

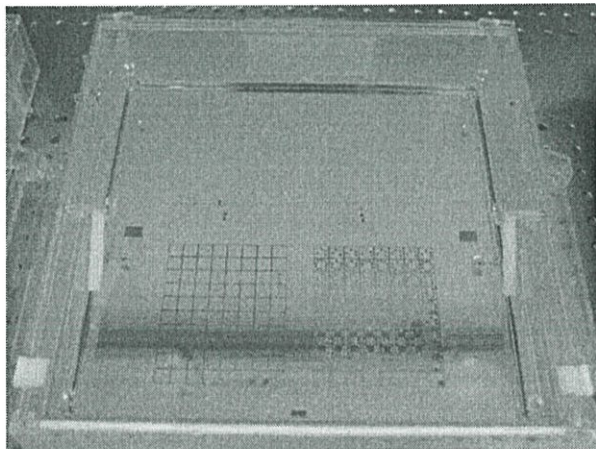
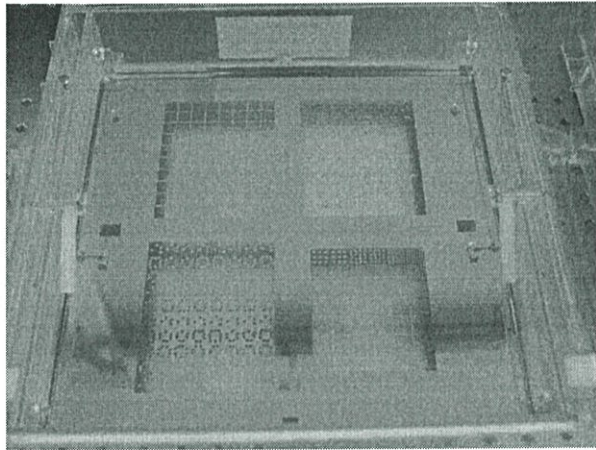


(ฉ) ชั้นที่ 6 แพด (Pad)

รูปที่ 4.16 (ก) - (ฉ) ชั้นทั้งหมดสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน



รูปที่ 4.17 โครงสร้างของอุปกรณ์

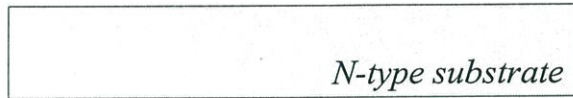


รูปที่ 4.18 กระจกต้นแบบ

#### 4.7.2 กระบวนการสร้างแมกนีโททรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

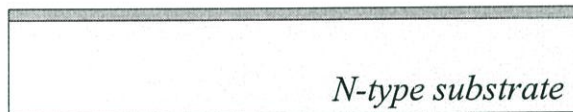
ขั้นตอนการสร้างตัวอุปกรณ์สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- เริ่มต้นจากการนำแผ่นซิลิคอนมาทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดและกัดด้วยสารเคมีอัตโนมัติ (Automatic Wet Bench - AWB) โดยใช้ Pirunha+SC1+HF



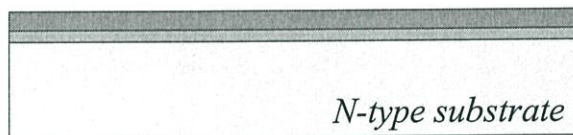
รูปที่ 4.19 แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น

- สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์  $\text{SiO}_2$  ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้งด้วยเตาปลุกออกไซด์แบบแห้งที่อุณหภูมิ  $900^\circ\text{C}$  โดยมีความหนา 15 nm



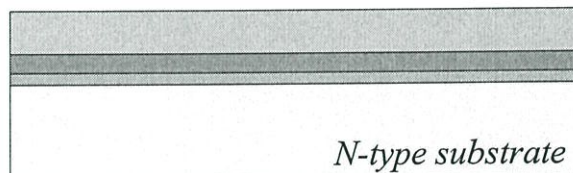
รูปที่ 4.20 การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

- สร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ด้วยเครื่องปลูกฟิล์มบางซิลิคอนไนไตรด์โดยมีความหนา 150 nm

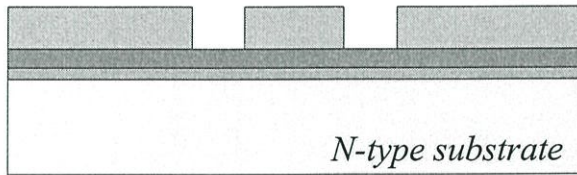


รูปที่ 4.21 การสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์

- ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีขั้นที่ 1 โดยเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มไวแสง จากนั้นทำการถ่ายแบบกระจกต้นแบบด้วยเครื่องถ่ายย่อแบบลายวงจร และนำไป Develop ด้วยเครื่องล้างน้ำยาไวแสง



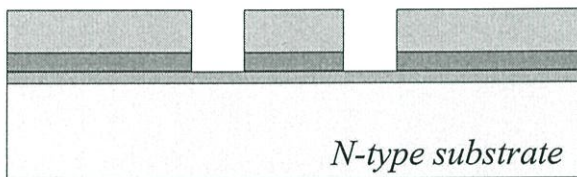
(ก)



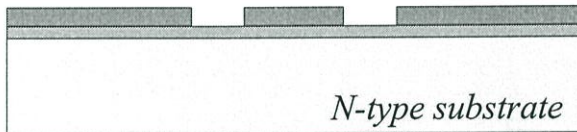
(ข)

รูปที่ 4.22 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีขั้นที่ 1 (ก) การเคลือบน้ำยาไวแสงและ (ข) การ develop

- กัดไนไตรต์ออกด้วยเครื่องกัดชั้นซิลิคอนออกไซด์ และทำการยิงฝังประจุลงไปได้บริเวณที่จะทำการสร้างชั้น LOCOS เพื่อลดผลกระทบของปัญหารอยต่อแฝง จากนั้นทำการล้างน้ำยาไวแสงออกให้หมด และทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ด้วย Pirunha+SC1



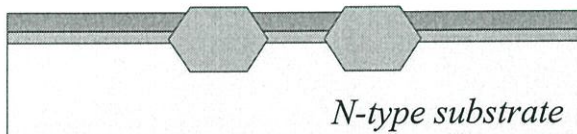
(ก)



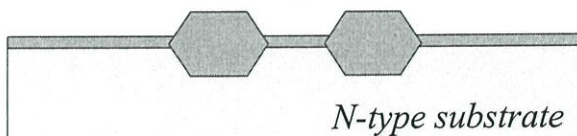
(ข)

รูปที่ 4.23 (ก) การกัดไนไตรต์และ (ข) ล้างน้ำยาไวแสง

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



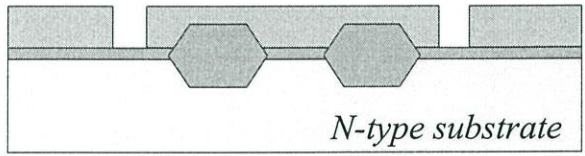
(ก)



(ข)

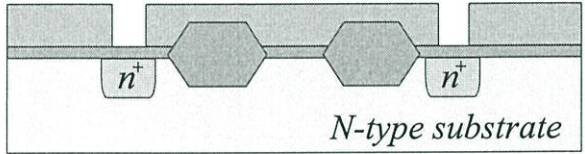
รูปที่ 4.24 (ก) การสร้างชั้น LOCOS oxide และ (ข) การกัดชั้นไนไตรต์

- ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีขั้นที่ 2 โดยเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มไวแสง จากนั้นทำการถ่ายแบบกระจกต้นแบบด้วยเครื่องถ่ายย่อแบบลายวงจรถ่าย และนำไป Develop ด้วยเครื่องล้างน้ำยาไวแสง

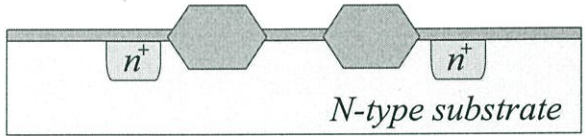


รูปที่ 4.25 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีขั้นที่ 2 หลังจากผ่านการ develop

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



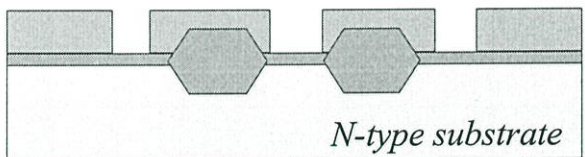
(ก)



(ข)

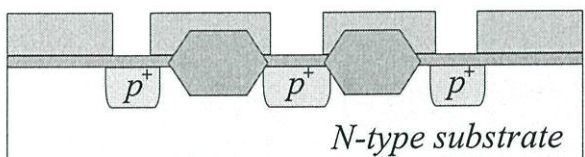
รูปที่ 4.26 (ก) การยิงฝังประจุฟอสฟอรัสและ (ข) การล้ามน้ำยาไวแสง

- ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีขั้นที่ 3 โดยเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มไวแสง จากนั้นทำการถ่ายแบบกระจกต้นแบบด้วยเครื่องถ่ายย่อแบบลายวงจร และนำไป Develop ด้วยเครื่องล้างน้ำยาไวแสง

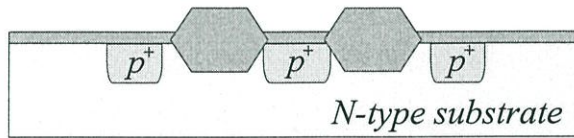


รูปที่ 4.27 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีขั้นที่ 3 หลังจากผ่านการ develop

- ทำการยิงฝังประจุโบรอนความเข้มข้นอะตอมสารเจือ  $1e^{16}$  atom/cm<sup>3</sup> พลังงาน 40 KeV ด้วยเครื่องยิงฝังประจุ เพื่อสร้างอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ที่ความลึกรอยต่อประมาณ 1 um จากนั้นลอกชั้นฟิล์มไวแสงออกให้หมด



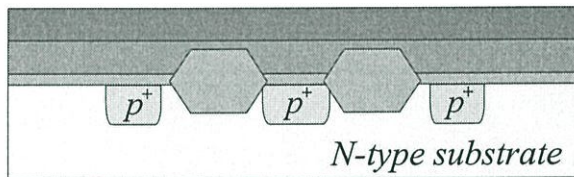
(ก)



(ข)

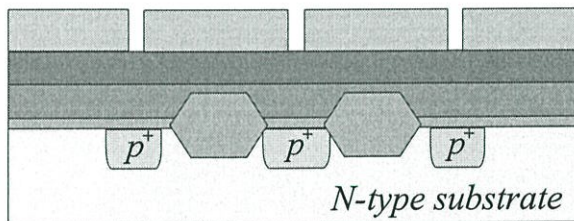
รูปที่ 4.28 (ก) การยิงฝังประจุโบรอนและ (ข) การล้างน้ำยาไวแสง

- ทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ด้วย Piranha+SC1 และทำการแอนนิลที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 30 นาที ด้วยเตาปลูกออกไซด์ด้วยไอน้ำ ต่อไปสร้างชั้น TEOS oxide ที่ความหนา 500 nm ด้วยเครื่องสร้างชั้นฟิล์มด้วยไอสารเคมีความดันต่ำ และสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยเครื่องปลูกฟิล์มไอสารเคมีแบบพลาสมา โดยมีความหนา 500 nm จากนั้นทำกระบวนการ Densification ด้วยเตาแพร่สารเจือ ที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 30 นาที



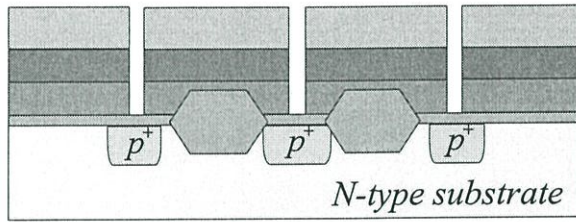
รูปที่ 4.29 การสร้างชั้น TEOS

- ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีขั้นที่ 4 โดยเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มไวแสง จากนั้นทำการถ่ายแบบกระจกต้นแบบด้วยเครื่องถ่ายย่อแบบลายวงจรถ และนำไป Develop ด้วยเครื่องล้างน้ำยาไวแสง

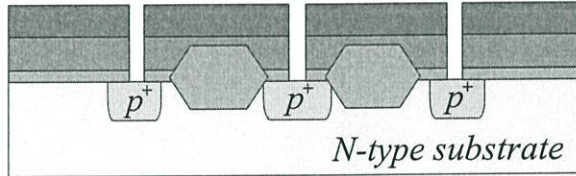


รูปที่ 4.30 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีขั้นที่ 4 หลังจากผ่านการ develop

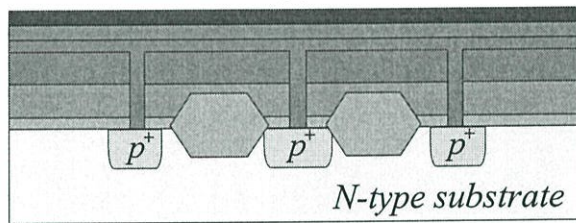
- กัดชั้นฟิล์ม TEOS และ PEOXIDE ออก จากนั้นลอกชั้นฟิล์มไวแสงออกให้หมด ต่อไปทำการกัดชั้นออกไซด์ออกด้วย HF 1% เป็นเวลา 60 วินาที จากนั้นสร้างชั้น Ti ที่ความหนา 30 nm และ TiN ที่ความหนา 80 nm , Al ที่ความหนา 700 nm และสุดท้ายสร้างชั้น TiN ที่ความหนา 80 nm โดยใช้เครื่องเคลือบฟิล์มโลหะด้วยเทคนิคสปีดเตอริง



(ก)



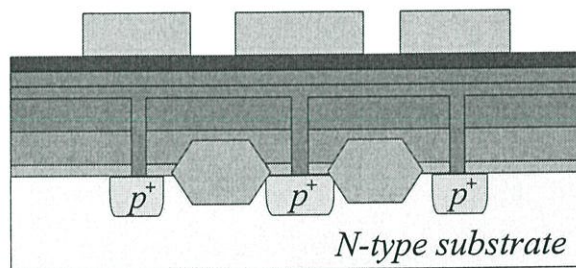
(ข)



(ค)

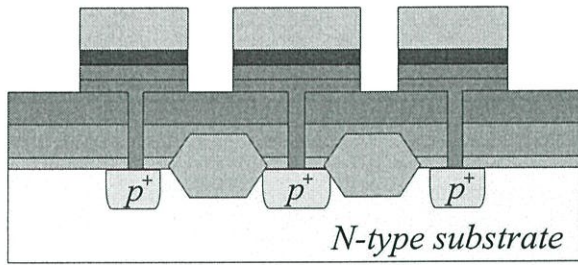
รูปที่ 4.31 (ก) การกัดชั้นออกไซด์และ (ข) ล้างน้ำยาไวแสงจากนั้น (ค) สร้างชั้นโลหะ

- ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีขั้นที่ 5 โดยเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มไวแสง จากนั้นทำการถ่ายแบบกระจกต้นแบบด้วยเครื่องถ่ายย่อแบบลายวงจรถ และนำไป Develop ด้วยเครื่องล้างน้ำยาไวแสง

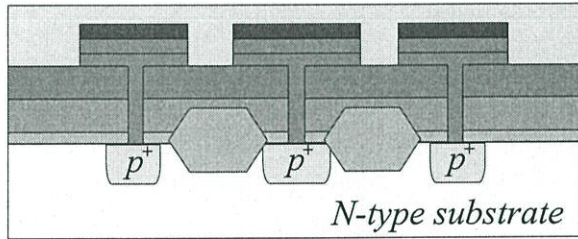


รูปที่ 4.32 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีขั้นที่ 5 หลังจากผ่านการ develop

- กัดชั้นโลหะส่วนที่ไม่ต้องการออกไปตามการออกแบบไว้ จากนั้นลอกชั้นน้ำยาไวแสงออกให้หมด และสร้างชั้นไนไตรด์ที่ความหนา 500 nm ด้วยเครื่องปลูกฟิล์มด้วยไอสารเคมีแบบพลาสมา



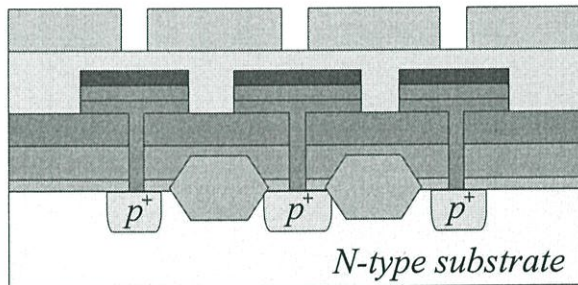
(ก)



(ข)

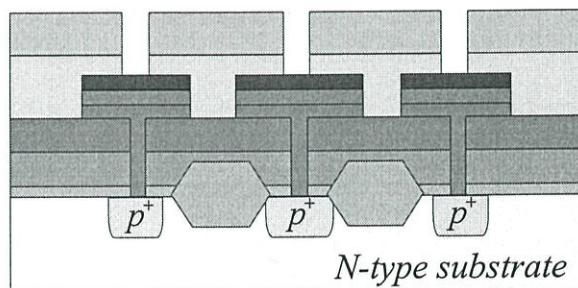
รูปที่ 4.33 (ก) การกัดชั้นโลหะส่วนที่ไม่ต้องการและ (ข) การสร้างชั้นไนไตรด์

- ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีขั้นที่ 6 โดยเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มไวแสง จากนั้นทำการถ่ายแบบกระจกต้นแบบด้วยเครื่องถ่ายย่อแบบลายวงจร และนำไป Develop ด้วยเครื่องล้างน้ำยาไวแสง

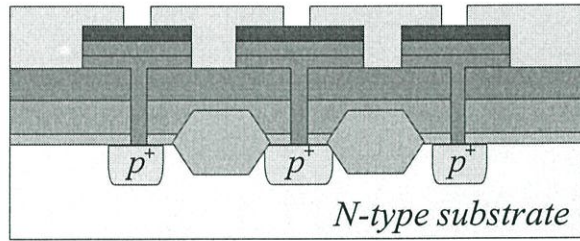


รูปที่ 4.34 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีขั้นที่ 6 หลังจากผ่านการ develop

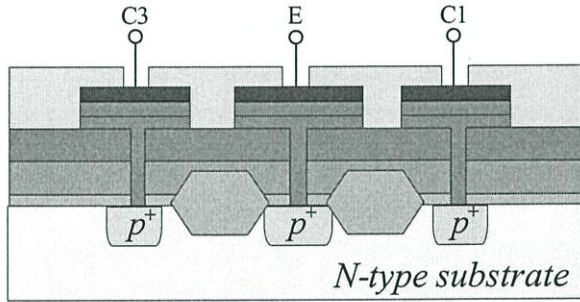
- กัดชั้นไนไตรด์ส่วนที่ไม่ต้องการ และลอกชั้นฟิล์มไวแสงออกให้หมด สุดท้ายทำกระบวนการ Sintering ด้วยเตาสร้างพันธะโลหะ โดยอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จแล้วแสดงดังรูป 4.35(ค) และใน รูปที่ 4.36 แสดงแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ภายในแผ่นซิลิคอน 1 แผ่น



(ก)

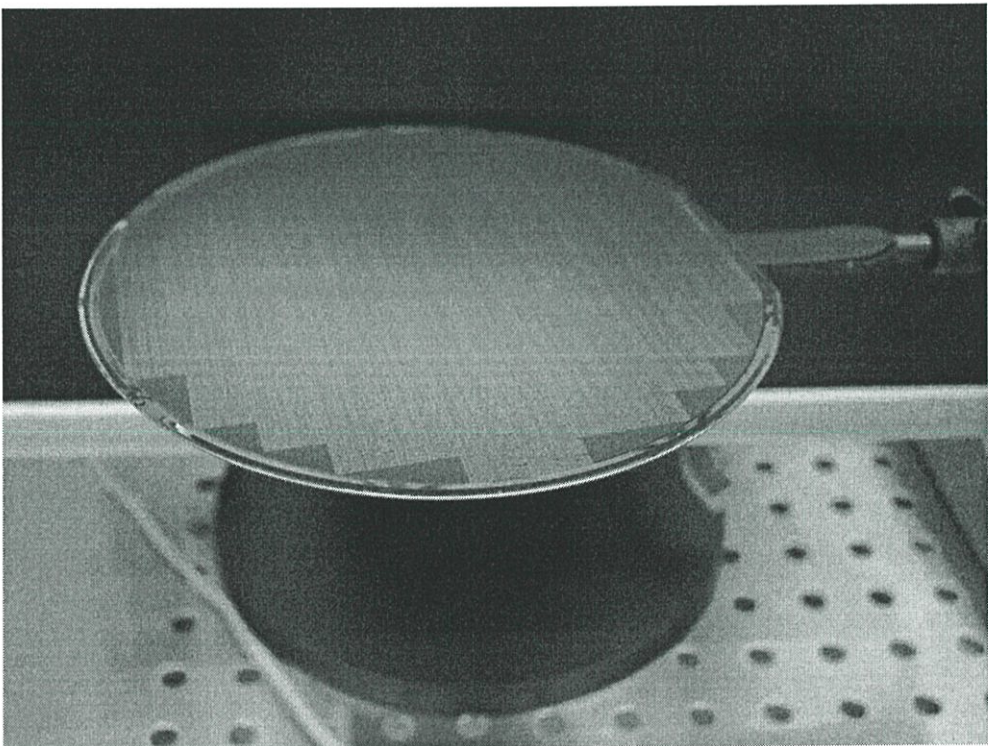


(ข)



(ค)

รูปที่ 4.35 (ก) การกัดชั้นไนไตรด์จากนั้น (ข) ล้างชั้นน้ำยาไวแสงและ (ค) อุปกรณ์ที่เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 4.36 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนในแผ่นซิลิคอนที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว

## บทที่ 5

### การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ซึ่งเราใช้โปรแกรม TCAD Sentaurus ในการจำลองการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางต่างๆ ( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ ) โดยเริ่มแรกเราจะทำการสร้างโครงสร้างของอุปกรณ์ขึ้นมาก่อน จากนั้นจึงทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความกว้างอิมิตเตอร์ ความกว้างเบส ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ เป็นต้น โดยค่ากระแสสามารถวัดได้ที่ขั้วเบสและขั้วคอลเลคเตอร์ ซึ่งกระแสที่ได้คือกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ตามลำดับ ต่อไปเราจะทำการไบอัสอุปกรณ์ด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่และให้สนามแม่เหล็กแก่อุปกรณ์และนำผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองแบบไปประยุกต์ใช้ในการวัดสนามแม่เหล็ก 3 แกน รวมทั้งแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจากอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริง

#### 5.1 การตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

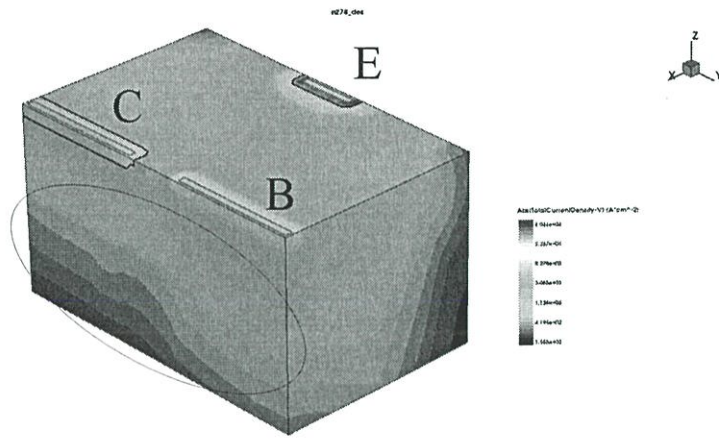
ปกติแล้วแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถวัดสนามแม่เหล็กได้ทั้งแนวตั้งและแนวนอน การทำงานเบื้องต้นของแมกนีโตทรานซิสเตอร์อาศัยผลของการรวมตัวใหม่และการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากแรงลอเรนซ์ ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กผ่านตัวอุปกรณ์ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ )

ขณะไม่มีสนามแม่เหล็กและอิมิตเตอร์ถูกไบอัสด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ พาหะโฮลจะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปยังขั้วเบสและรวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสกลายเป็นกระแสเบส และจะมีพาหะโฮลส่วนหนึ่งเคลื่อนที่ไปยังขั้วคอลเลคเตอร์กลายเป็นกระแสคอลเลคเตอร์ กระแสอิมิตเตอร์คือผลรวมระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์

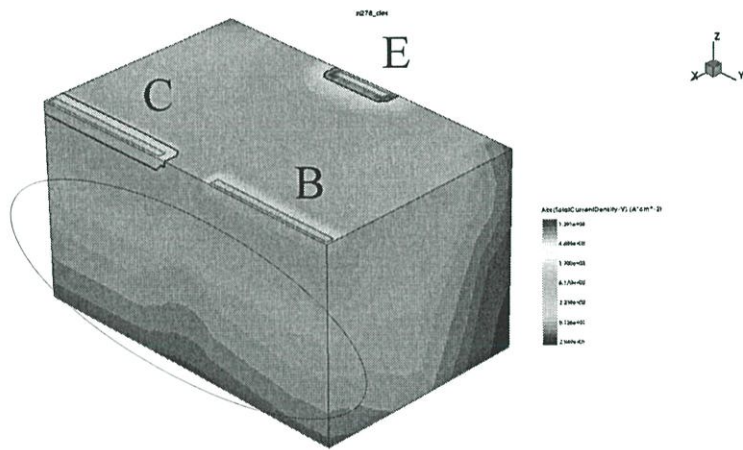
$$I_E = I_C + I_B$$

รูปที่ 5.1 แสดงผลการจำลองขณะไม่มีสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ โดยโครงสร้างถูกสร้างขึ้นจากโปรแกรม TCAD Sentaurus ความแตกต่างของความหนาแน่นกระแสของอุปกรณ์จะถูกแสดงโดยเฉดสีต่างๆ โดยทั่วไปแล้วในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กที่แสดงดังรูปที่ 5.1(ก) จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นกระแสที่ขั้วเบสมากกว่าขั้วคอลเลคเตอร์ นั่นหมายความว่ากระแสเบสมีค่ามากกว่ากระแสคอลเลคเตอร์ ดังนั้นจึงต้องทำการปรับค่าออฟเซตให้เป็นศูนย์ก่อนการใช้งานแสดงดังรูปที่ 5.1(ข) ดังนั้นความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์จะมีค่าเป็นศูนย์

$$\Delta I_{CB} = I_C - I_B = 0$$



(ก)

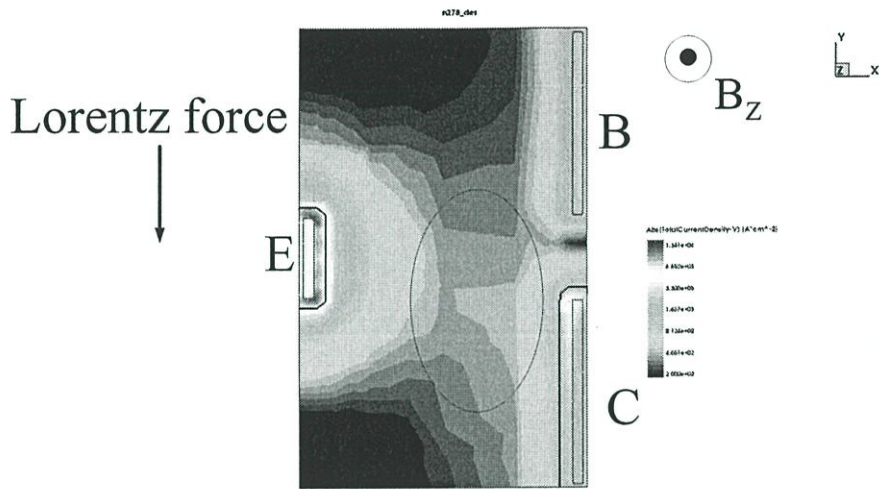


(ข)

รูปที่ 5.1 ความหนาแน่นกระแสโดยการจำลองแบบ 3 มิติขณะไม่มีสนามแม่เหล็กในกรณี (ก) ไม่ได้ปรับค่าออฟเซต (ข) เมื่อปรับค่าออฟเซต

### 5.1.1 การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง $B_z$

การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์อาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากแรงลอเรนซ์ ส่งผลให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากทิศทางเดิม โดยในรูปที่ 5.2 แสดงการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะขณะมีสนามแม่เหล็กแนวตั้งผ่านตัวอุปกรณ์ จากรูปจะเห็นได้ว่าการเบี่ยงเบนจะทำให้พาหะไปสะสมที่ขั้วคอลเลคเตอร์มากขึ้นทำให้กระแสคอลเลคเตอร์มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

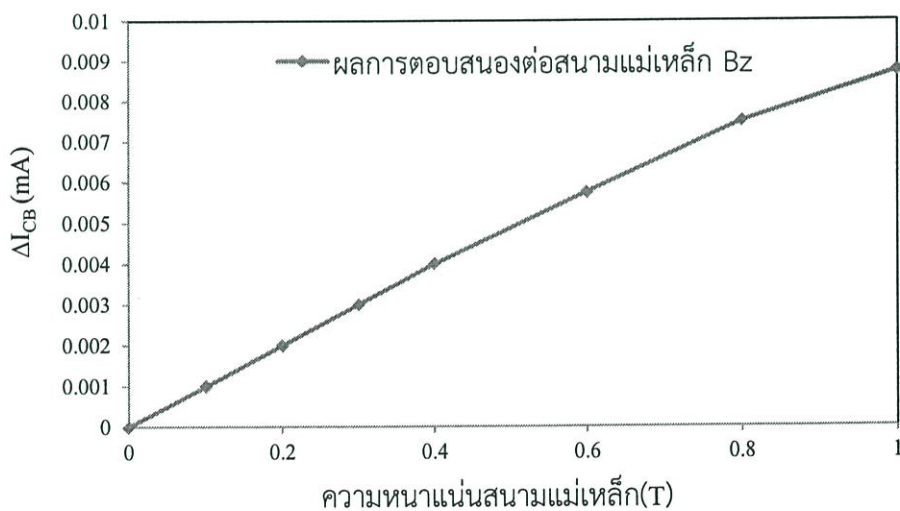


รูปที่ 5.2 ผลการเบี่ยงเบนของพาหะของแมกนีไททรานซิสเตอร์ขณะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทิศทาง Z

โดยผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งนั้นจะหาได้จากความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสดังนี้

$$\Delta I_{CB} = I_C - I_B \quad (5.1)$$

ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งในทิศ Z ของตัวอุปกรณ์ที่สนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 1 เทสลาแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 ขณะมีสนามแม่เหล็กผ่านอุปกรณ์พาหะจะถูกเบี่ยงเบนโดยแรงลอเรนซ์ไปยังขั้วคอลเลคเตอร์ซึ่งจะทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ ( $I_C$ ) มีค่ามากขึ้นและกระแสเบส ( $I_B$ ) มีค่าน้อยลง ดังนั้นความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสจะมีค่าเป็นบวกและมีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก 0.0092 mA/T

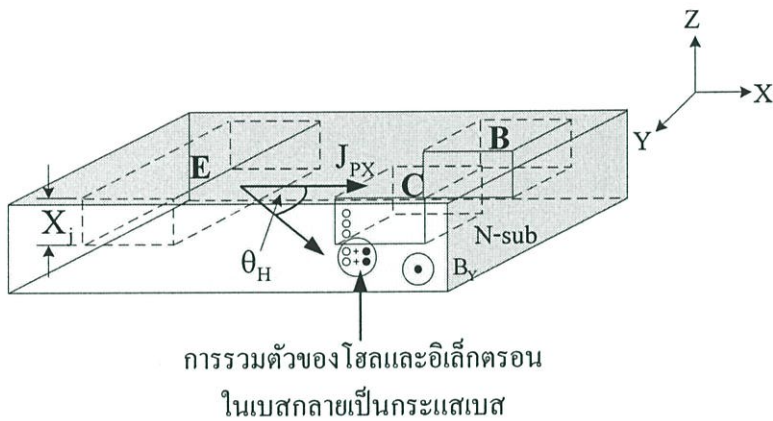


รูปที่ 5.3 กราฟผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง Z

จากการจำลองเราใช้กระแสไบอัส  $I_E = 1 \text{ mA}$  ซึ่งจากผลการจำลองพบว่า เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้การเปลี่ยนแปลงค่ากระแสเอาท์พุทมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยในลักษณะเชิงเส้น เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กในทิศทาง  $Z$  มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงลอเรนซ์ที่กระทำต่อพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

### 5.1.2 การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน $B_Y$

รูปที่ 5.4 แสดงทิศทางของพาหะขณะมีสนามแม่เหล็กแนวอน ( $B_Y$ ) ตัดผ่านแมกนีโตทรานซิสเตอร์ การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอนอาศัยความแตกต่างระหว่างพาหะที่รวมตัว (recombination) ในเบสกับพาหะสะสมที่คอลเลคเตอร์ กลไกในการเกิดความแตกต่างอาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection)

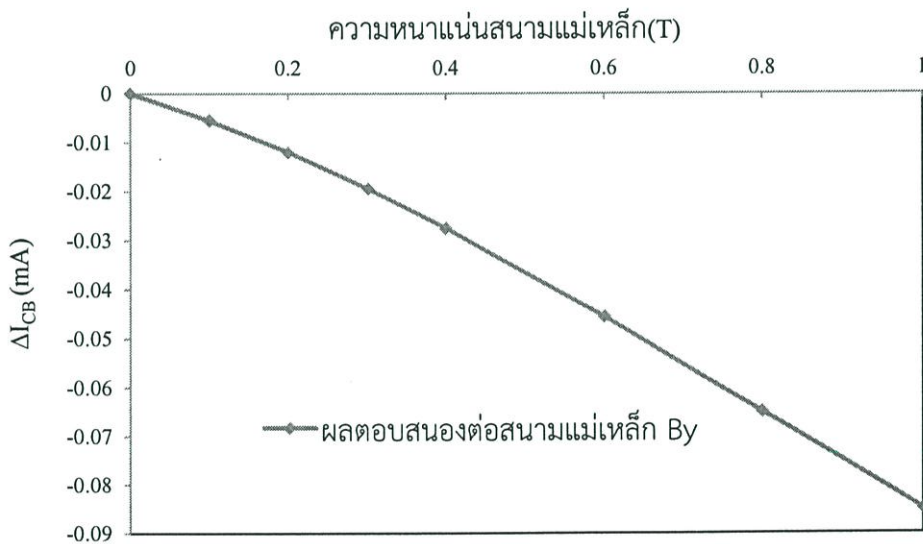


รูปที่ 5.4 ทิศทางของพาหะขณะมีสนามแม่เหล็กแนวอน ( $B_Y$ )

โดยทำการจำลองที่ค่ากระแสการทำงานอิมิตเตอร์  $I_E = 1 \text{ mA}$  เปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก 0 ถึง 1 เทสลา ในภาวะปกติไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน ( $B_Y = 0$ ) ค่ากระแสเอาท์พุทที่วัดได้เท่ากับศูนย์ โดยกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์เท่ากันไม่เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสอง ( $\Delta I_{CB} = 0$ ) การทำงานในภาวะปกติของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ดังอธิบายมาแล้วจากรูปที่ 5.1 จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจาก 0 เป็น 1 เทสลา นั่นคือมีสนามแม่เหล็กแนวอน ( $B_Y$ ) ตัดผ่านตัวอุปกรณ์ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง  $-z$  แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะ (โฮล) ซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทาง  $x$  ทำให้พาหะ (โฮล) เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์จึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ ( $\Delta I_{CB} \neq 0$ ) ค่ากระแสเอาท์พุทที่วัดได้ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์จึงไม่เท่ากับศูนย์สามารถวิเคราะห์การทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แสดงดังรูปที่ 5.4 จากการจำลองแมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอนได้โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์ กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากผลของการเบี่ยงเบนพาหะ (carrier deflection) สนามแม่เหล็กแนวอน ( $B_Y$ ) ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง  $-z$  ซึ่งแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะโฮลที่เคลื่อนที่ในทิศทาง  $X$  โฮลจะ

เคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปในทิศทางเดียวกับแรงลอเรนซ์และไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสกลายเป็นกระแสเบสโดยที่มีโฮลบางส่วนเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลคเตอร์จะกลายเป็นกระแสคอลเลคเตอร์นั่นคือเกิดความไม่เท่ากันของกระแสทั้งสอง ( $\Delta I_{CB} \neq 0$ ) ซึ่งจากโครงสร้างอุปกรณ์ที่มีความลึกรอยต่อ ( $X_j$ ) ที่ต้นทำให้กระแสเบสที่ได้จากโฮลที่รวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสมีค่ามากกว่ากระแสคอลเลคเตอร์ซึ่งเกิดจากพาหะเบี่ยงเบนสะสมที่คอลเลคเตอร์อย่างมาก จึงทำให้กระแสเบสมีค่ามากขึ้นเนื่องจากโครงสร้างมีความลึกรอยต่อ ( $X_j$ ) ที่ต้นทำให้โฮลเปลี่ยนแปลงมุม  $\Theta_H$  เบี่ยงเบนเพียงเล็กน้อยสามารถไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสเบสได้ โดยหาความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสได้แบบเดียวกับการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง

รูปที่ 5.5 แสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวอนในทิศ  $y$  ของอุปกรณ์ที่ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 1 เทสลา จากที่ได้อธิบายไปแล้วก่อนหน้านี้ เมื่อมีสนามแม่เหล็กแนวอนผ่านตัวอุปกรณ์ ผลของการรวมตัวใหม่และการเบี่ยงเบนของพาหะจะทำให้กระแสคอลเลคเตอร์( $I_C$ )ลดลงและกระแสเบส( $I_B$ )มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นความแตกต่างของกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสที่ได้จึงเป็นลบและมีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก  $-0.08$  mA/T.



รูปที่ 5.5 กราฟผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง Y

### 5.1.3 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวอน $B_x$

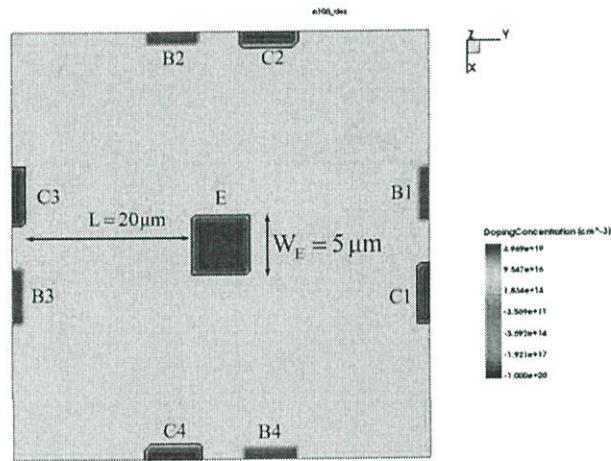
ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวอน ( $B_x$ ) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์จะไม่ก่อให้เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากว่ากระแสมีทิศทางขนานกับสนามแม่เหล็กเพราะฉะนั้นแมกนีโตทรานซิสเตอร์ไม่สามารถวัดสนามแม่เหล็กแนวอน ( $B_x$ ) ได้

## 5.2 การประยุกต์ใช้แมกนีโตทรานซิสเตอร์ในการวัดสนามแม่เหล็ก 3 แกน

จากผลการจำลองการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ได้เรานำมาประยุกต์ใช้สำหรับการวัดสนามแม่เหล็ก 3 แกน

### 5.2.1 โครงสร้างของอุปกรณ์

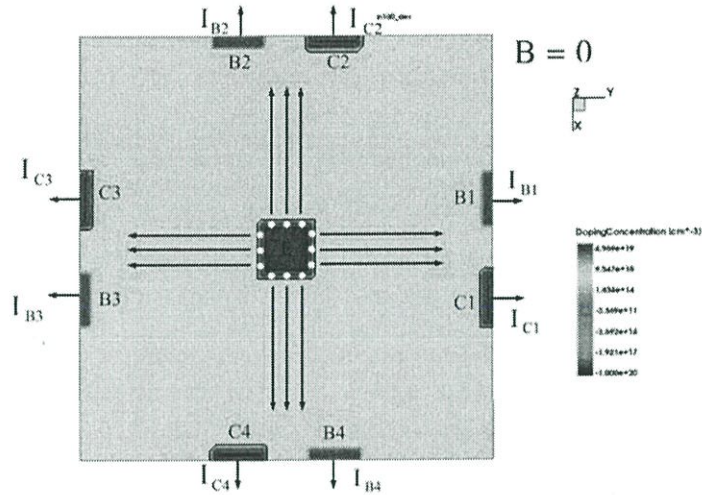
โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน แสดงดังรูปที่ 5.6 อุปกรณ์พัฒนามาจากการรวมกันของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ 4 ตัวซึ่งใช้อิมิตเตอร์ร่วมกันและขั้วเบสและขั้วคอลเลคเตอร์แยกจากกัน เพราะฉะนั้นโครงสร้างของอุปกรณ์จะประกอบไปด้วยอิมิตเตอร์ 1 ขั้วเบส 4 ขั้วและคอลเลคเตอร์ 4 ขั้ว กำหนดให้อิมิตเตอร์และเบสเป็นชนิดพี ส่วนเบสและฐานรองเป็นชนิดเอ็น และความลึกของรอยต่อ ( $X_j$ ) มีค่า 1 ไมโครเมตร มีความกว้างของอิมิตเตอร์ ( $W_E$ ) 5 ไมโครเมตร และระยะการเบี่ยงเบนของพาหะ ( $L$ ) 20 ไมโครเมตร



รูปที่ 5.6 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

### 5.2.2 ขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก

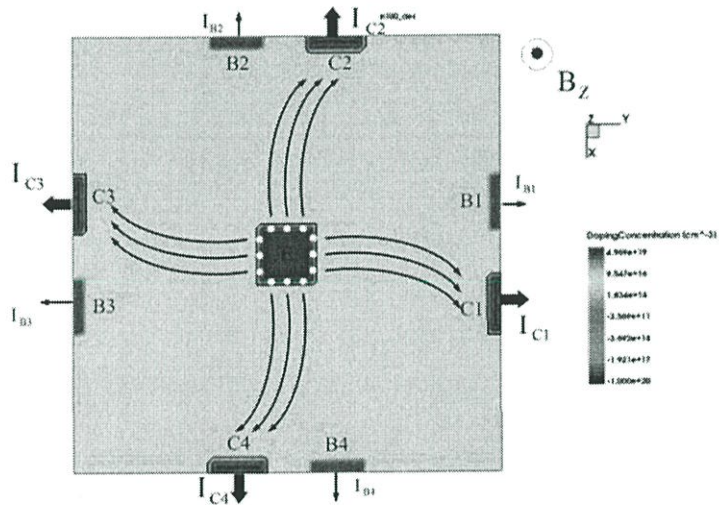
รูปที่ 5.7 แสดงการทำงานเบื้องต้นของอุปกรณ์ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ 1 ตัว โดยในขณะที่ยังปราศจากสนามแม่เหล็กและอิมิตเตอร์ถูกไบอัสด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่พาหะโฮลจะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปยังขั้วเบสและรวมตัวกับอิเล็กตรอนในเบสกลายเป็นกระแสเบส และจะมีพาหะโฮลส่วนหนึ่งเคลื่อนที่ไปยังขั้วคอลเลคเตอร์กลายเป็นกระแสคอลเลคเตอร์ และเมื่อทำการปรับค่าออฟเซตให้เป็นศูนย์ ดังนั้นจะทำให้กระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเท่ากัน ( $\Delta I_{CB} = 0$ )



รูปที่ 5.7 การไหลของกระแสพาหะขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก ( $B=0$ )

### 5.2.3 การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง $B_z$

รูปที่ 5.8 แสดงการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง ( $B_z$ ) อุปกรณ์ใช้แมกนีโตทรานซิสเตอร์ 4 ตัวที่มีกระแสตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง ( $B_z$ ) การเบี่ยงเบนของพาหะจะเกิดขึ้นที่คูเบสและคอลเลคเตอร์ทุกคู่ โดยพาหะโฮลจะถูกเบี่ยงเบนในทิศทางของแรงลอเรนซ์ไปสะสมที่ขั้วคอลเลคเตอร์กลายเป็นกระแสคอลเลคเตอร์ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้กระแสคอลเลคเตอร์มีค่ามากขึ้นและกระแสเบสที่ค่าน้อยลง ( $\Delta I_{CB} \neq 0$ )

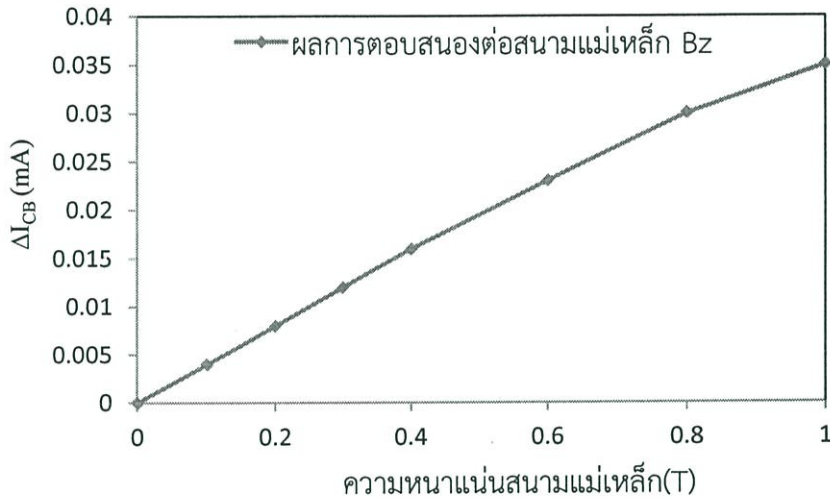


รูปที่ 5.8 ทิศทางการเบี่ยงเบนของพาหะขณะตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง  $B_z$

โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนสามารถวัดสนามแม่เหล็กแนวตั้งได้โดยใช้หลักการรวมกระแส โดยการนำผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 ตัวมารวมกันดังสมการ (5.2) ซึ่งการวัดแบบรวมกระแสนั้นจะทำให้ค่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นด้วย

$$\Delta I_{CB(Z)} = \Delta I_{CB(1)} + \Delta I_{CB(2)} + \Delta I_{CB(3)} + \Delta I_{CB(4)} \quad (5.2)$$

ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งในทิศ Z ของตัวอุปกรณ์ที่สนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-1 เทสลาแบบรวมกระแสตามสมการ (5.2) แสดงได้ดังรูปที่ 5.9 ขณะมีสนามแม่เหล็กผ่านอุปกรณ์พาหะจะถูกเบี่ยงเบนโดยแรงลอเรนซ์ไปยังขั้วคอลเลคเตอร์ซึ่งจะทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ ( $I_C$ ) มีค่ามากขึ้นและกระแสเบส ( $I_B$ ) มีค่าน้อยลง ดังนั้นความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสจะมีค่าเป็นบวกและจากกราฟค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมีค่า 0.0369 mA/T



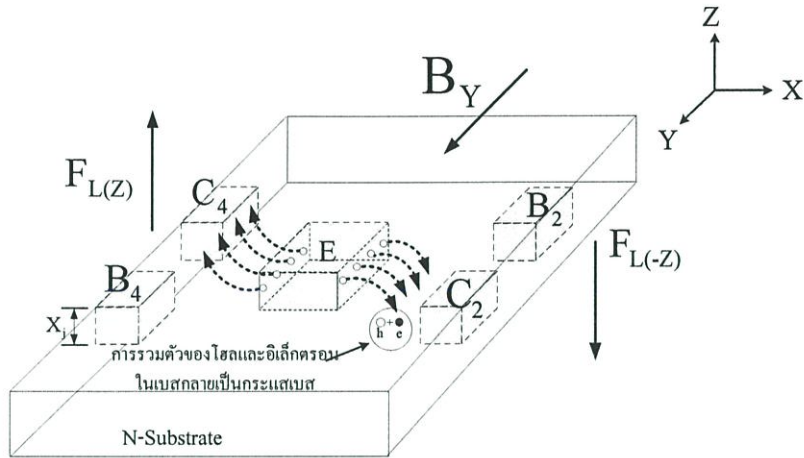
รูปที่ 5.9 กราฟผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง Z แบบรวมกระแส

#### 5.2.4 การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน $B_y$

รูปที่ 5.10 แสดงการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน ( $B_y$ ) อุปกรณ์ใช้แมกนีโตทรานซิสเตอร์ 2 ตัวซึ่งมีกระแสตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน ( $B_y$ ) โดยในขณะที่เกิดสนามแม่เหล็กแนวอน ( $B_y$ ) แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 และตัวที่ 4 จะเกิดการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากแรงลอเรนซ์เพราะว่ากระแสมีทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กแต่แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 1 และตัวที่ 3 จะไม่เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะเพราะว่ากระแสมีทิศขนานกับสนามแม่เหล็ก โดยแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 พาหะโฮลจะเบี่ยงเบนเข้าไปในฐานรองหรือทิศทาง -Z การรวมตัวของอิเล็กตรอนในฐานรองซึ่งมีชนิดเหมือนกับเบสจะทำให้เกิดเป็นกระแสเบสและเนื่องจากโครงสร้างมีความลึกกรวยต่อ (Xj) ที่น้อยทำให้โฮลเปลี่ยนแปลงมุมเบี่ยงเบนเพียงเล็กน้อยก็สามารถไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนในฐานรองได้ ผลที่เกิดขึ้นจะทำให้กระแสเบส ( $I_{B2}$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากและกระแสคอลเลคเตอร์มีค่าลดลงอย่างมาก ( $I_{C2}$ ) เช่นเดียวกัน และที่แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 4 พาหะโฮลจะถูกเบี่ยงเบนเข้าไปยังขั้วคอลเลคเตอร์หรือทิศทาง Z กลายเป็นกระแสคอลเลคเตอร์ ซึ่งการเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้กระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและกระแสเบสก็มีค่าลดลงเล็กน้อยเช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 2

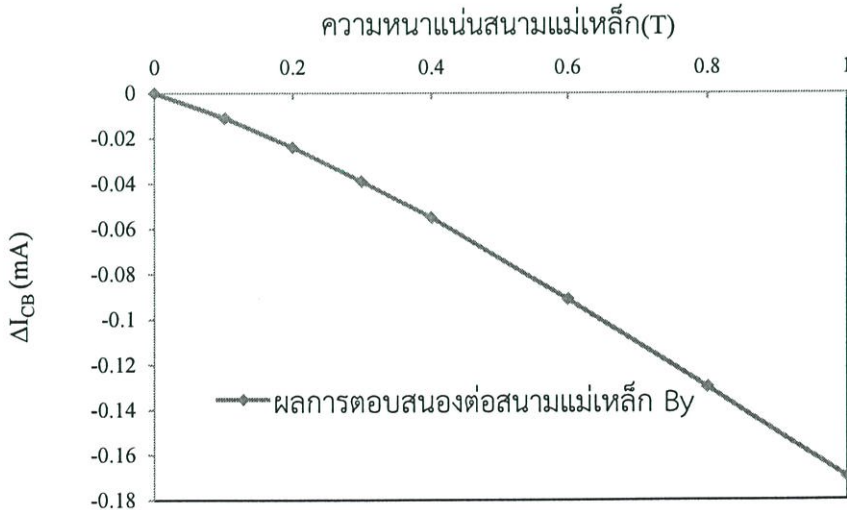
ดังนั้นเราสามารถวัดสนามแม่เหล็กแนวอน ( $B_y$ ) ได้โดยใช้หลักการรวมกระแส ซึ่งสามารถหาได้จากผลรวมความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 4 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอนแบบรวมกระแสได้ดังสมการ (5.3)

$$\Delta I_{CB(y)} = \Delta I_{CB(2)} + \Delta I_{CB(4)} \quad (5.3)$$



รูปที่ 5.10 ทิศทางการเบี่ยงเบนของพาหะขณะตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน  $B_y$

รูปที่ 5.11 แสดงกราฟผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวอนในทิศ  $y$  แบบรวมกระแสของอุปกรณ์ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-1 เทสลา จากที่ได้อธิบายไปแล้วก่อนหน้านี้ เมื่อมีสนามแม่เหล็กแนวอนผ่านตัวอุปกรณ์ ผลของการรวมตัวใหม่และการเบี่ยงเบนของพาหะจะทำให้แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 มีค่ากระแสคอลเลคเตอร์ ( $I_{C2}$ ) ลดลงและกระแสเบส ( $I_{B2}$ ) มีค่ามากขึ้น ซึ่งทำให้ผลต่างกระแสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 มีค่าเป็นลบ และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 4 กระแสคอลเลคเตอร์ ( $I_{C4}$ ) มีค่ามากขึ้นแต่กระแสเบส ( $I_{B4}$ ) มีค่าลดลง ซึ่งทำให้ผลต่างกระแสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 4 มีค่าเป็นบวก แต่เนื่องจากแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 มีค่าผลต่างกระแสเป็นลบที่มากกว่าแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 4 จึงทำให้ผลรวมกระแสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 ตัวจากสมการ (5.3) มีค่าเป็นลบและมีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก  $0.1601\text{-mA/T}$

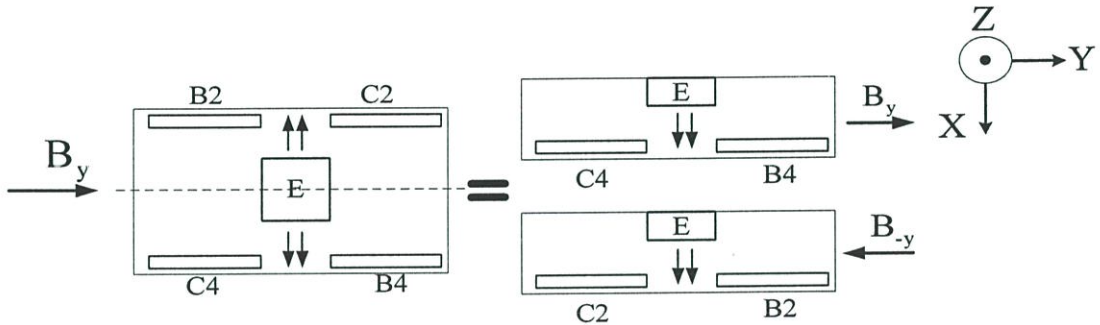


รูปที่ 5.11 กราฟผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทิศทาง  $Y$  แบบรวมกระแส

การที่ผลรวมกระแสของสมการ (5.3) มีค่าไม่เป็นศูนย์เกิดจากจากความไม่สมมาตร ผลของการรวมตัวใหม่และการเบี่ยงเบนพาหะของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสที่มีชนิดการโด๊ปเหมือนกันระหว่างเบสและฐานรองซิลิคอน ซึ่งทำให้ผลต่างกระแสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 2

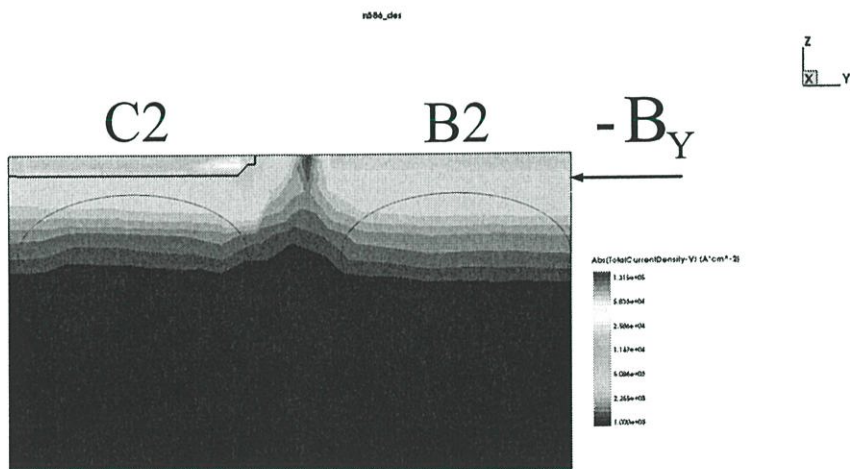
และแมกนีโททรานซิสเตอร์ตัวที่ 4 มีค่าไม่เท่ากันจึงทำให้อุปกรณ์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอนแบบรวมกระแสได้

เราสามารถพิสูจน์ผลต่างกระแสของแมกนีโททรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 และแมกนีโททรานซิสเตอร์ตัวที่ 4 ได้โดยใช้การจำลองแบบด้วยโปรแกรม TCAD Sentaurus จำลองการทำงานของขั้ว B(2)-C(2) และขั้ว B(4)-C(4) โดยกำหนดให้กระแสมีทิศทางไปตามแกน x และมีสนามแม่เหล็ก ตั้งฉากกับทิศทางกระแส จากรูปที่ 5.12 เมื่อกำหนดให้กระแสมีทิศทาง x ที่ขั้ว B(2)-C(2) ต้องให้สนามแม่เหล็กทิศทาง -y เพื่อให้ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเหมือนกับกระแสไหลในทิศทาง -x และมีสนามแม่เหล็กทิศทาง y

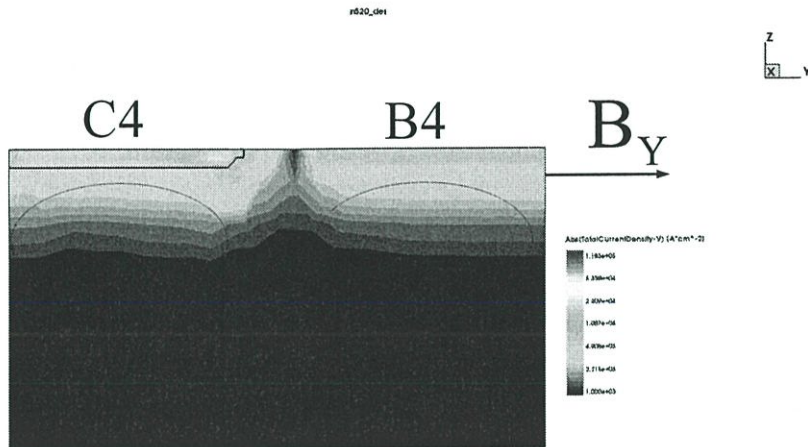


รูปที่ 5.12 การกำหนดทิศทางกระแสและทิศทางสนามแม่เหล็กของการจำลองการทำงาน

รูปที่ 5.13 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



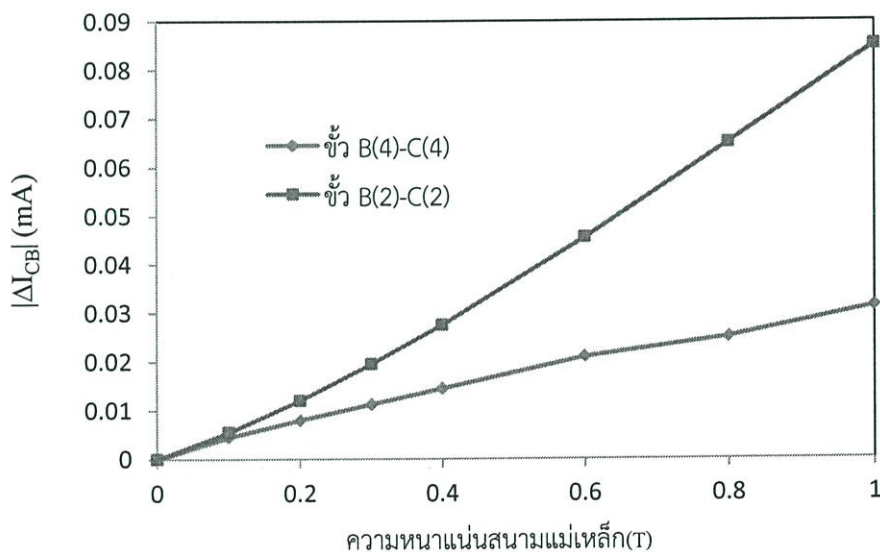
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.13 ความหนาแน่นกระแสโดยการจำลอง 3 มิติของ (ก) ขั้ว B(2)-C(2) และ (ข) ขั้ว B(4)-C(4) ขณะมีสนามแม่เหล็กแนวนอน

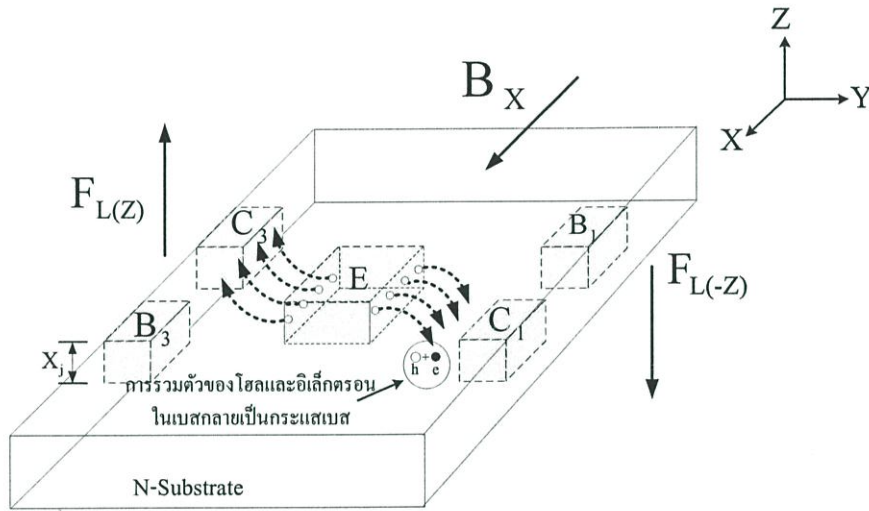
รูปที่ 5.14 แสดงกราฟผลการจำลองการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้าม (ทิศทาง  $y$  และ  $-y$  ของตัวอุปกรณ์) โดยจากรูปแสดงให้เห็นว่า  $|\Delta I_{CB}|$  ที่ได้จากการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามมีค่าต่างกันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันของขั้ว B(2)-C(2) และขั้ว B(4)-C(4) ทำให้ผลลัพธ์ของการรวมกระแสจากสมการ (5.3) มีค่าไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นอุปกรณ์สามารถวัดสนามแม่เหล็กแนวนอนโดยใช้วิธีรวมกระแสได้



รูปที่ 5.14 กราฟการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวนอน(แกน  $y$ ) ของขั้ว B(2)-C(2) และขั้ว B(4)-C(4)

### 5.2.5 การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน $B_x$

รูปที่ 5.15 แสดงการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน ( $B_x$ ) ซึ่งเหมือนกับในกรณีตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน ( $B_y$ ) แต่ต่างกันว่าแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 4 จะไม่เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะเพราะว่ากระแสมีทิศทางกับสนามแม่เหล็ก การเบี่ยงเบนของพาหะจะเกิดขึ้นที่เฉพาะแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 1 และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 3 เท่านั้น เพราะว่ากระแสมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก



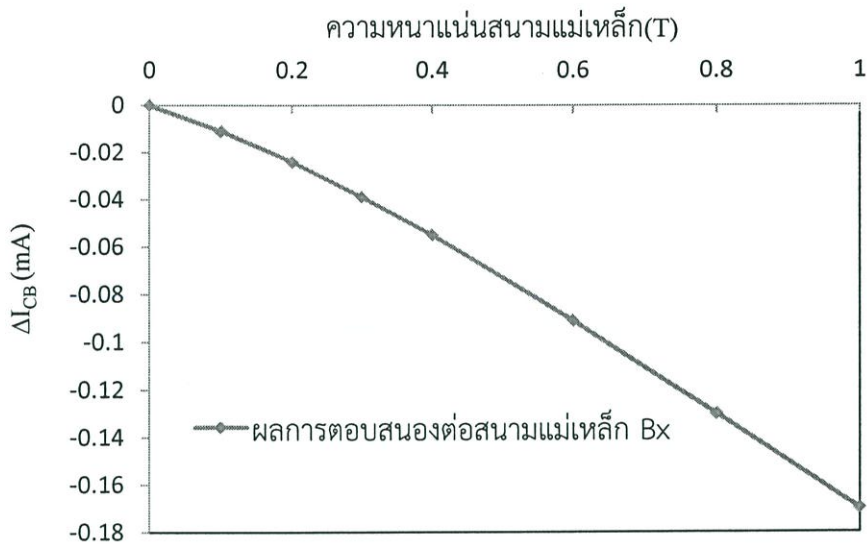
รูปที่ 5.15 ทิศทางการเบี่ยงเบนของพาหะขณะตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน  $B_x$

การเบี่ยงเบนของพาหะที่แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 1 จะเกิดในทิศทาง  $-Z$  ซึ่งผลของการเบี่ยงเบนจะทำให้กระแสเบสที่ค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่วนกระแสคอลเลคเตอร์มีค่าลดลงอย่างมากเช่นเดียวกัน และที่แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 3 การเบี่ยงเบนของพาหะเกิดขึ้นในทิศทาง  $Z$  ซึ่งจะส่งผลให้กระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและกระแสเบสก็มีค่าลดลงเล็กน้อยเช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเปลี่ยนแปลงของกระแสในแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 1

ดังนั้นเราสามารถวัดสนามแม่เหล็กแนวอน ( $B_x$ ) ได้โดยใช้หลักการรวมกระแส ซึ่งสามารถหาได้จากผลรวมความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสเบสของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 1 และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 1 ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอนแบบรวมกระแสได้ดังสมการ (5.6)

$$\Delta I_{CB(x)} = \Delta I_{CB(1)} + \Delta I_{CB(3)} \quad (5.6)$$

รูปที่ 5.16 แสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทาง  $x$  แบบรวมกระแสของอุปกรณ์ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 1 เทสลา ซึ่งผลการตอบสนองที่ได้จะมีค่าเหมือนกับการตอบสนองในทิศทาง  $y$  และจากกราฟค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมีค่า 0.1601-mA/T



รูปที่ 5.16 กราฟผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทิศทาง X แบบรวมกระแส

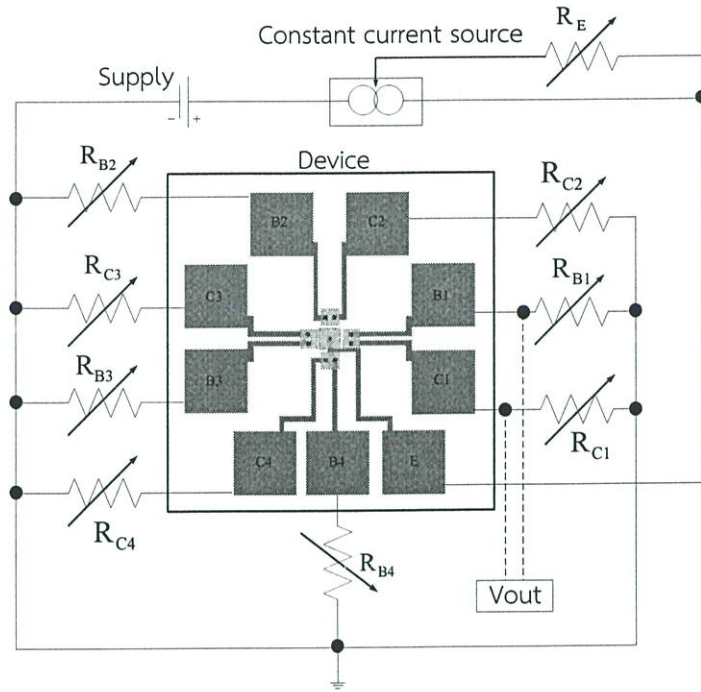
### 5.3 การตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริง

จากผลการจำลองการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจากการจำลองผลแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างดังกล่าวสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนได้ หลังจากนั้นเราจะทำการสร้างตัวอุปกรณ์จริงขึ้นมาเพื่อแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนจากการจำลองผลสามารถใช้งานได้จริง และเพื่อสะดวกต่อการวัด ในการวัดสนามแม่เหล็กด้วยตัวอุปกรณ์จริงนั้นไม่ได้วัดกระแสเหมือนการจำลองแบบด้วยโปรแกรม TCAD Santaurus เนื่องจากปัญหาความยุ่งยากในการวัดแบบกระแส เพราะฉะนั้นเราจะทำการวัดแรงดันเอาท์พุทที่เกิดขึ้นขณะมีสนามแม่เหล็กผ่านตัวอุปกรณ์

#### 5.3.1 วงจรวัดผลการทดลอง

ในการวัดผลการทดลองหรือการวัดการตอบสนองของอุปกรณ์ต่อสิ่งแวดล้อมที่ทำการวัดนั้น จำเป็นต้องมีการนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายนอกมาต่อร่วมกับอุปกรณ์ เพื่อให้สามารถวัดผลการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งอาจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดัน, กระแสไฟฟ้า หรือความต้านทาน เป็นต้น

ในการทดลองนี้วิธีการของการวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจะมีการนำอุปกรณ์ภายนอกมาต่อร่วมด้วยดังรูปที่ 5.17 ซึ่งเป็นการต่ออุปกรณ์เซ็นเซอร์เข้ากับวงจรวัดผล โดยประกอบด้วย อุปกรณ์เซ็นเซอร์, แหล่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่จ่ายไฟเลี้ยงให้แก่อุปกรณ์ทั้งหมด, วงจรปรับกระแสคงที่ ทำหน้าที่ในการรักษาระดับกระแสที่ไหลให้คงที่ตลอดการวัดผล, ความต้านทาน  $R_E$  ทำหน้าที่ในการปรับปริมาณกระแสไบอัส หรือกระแสอิมิตเตอร์ ( $I_E$ ), ตัวต้านทาน  $R_{B1}, R_{B2}, R_{B3}, R_{B4}, R_{C1}, R_{C2}, R_{C3}$  และ  $R_{C4}$  ทำหน้าที่ในการปรับกระแสเบส ( $I_B$ ) และกระแสคอลเลคเตอร์ ( $I_C$ ) ตัวต่างๆ เพื่อปรับค่า Offset ระหว่างขั้วเบสกับขั้วคอลเลคเตอร์



รูปที่ 5.17 วงจรวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับ สนามแม่เหล็ก 3 แกน

ในการทดลองนี้ โวลต์ซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยในเบส (Minority carrier) คือพาหะหลักที่มีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก โดยจะถูกฉีด (Injection) จากอิมิตเตอร์ผ่านไปยังเบสกับคอลเลคเตอร์ เกิดเป็นกระแสเบส ( $I_B$ ) และกระแสคอลเลคเตอร์ ( $I_C$ ) ตามลำดับ โดยแสดงความสัมพันธ์นี้ได้ดังสมการ (5.7) ดังนี้

$$I_E = (I_{B1} + I_{C1}) + (I_{B2} + I_{C2}) + (I_{B3} + I_{C3}) + (I_{B4} + I_{C4}) \quad (5.7)$$

การวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ จะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันเอาต์พุตหรือแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาเบสกับขาคอลเลคเตอร์ ( $V$ -output หรือ  $V_{BC}$ ) โดยในสภาวะปกติที่ปราศจากสนามแม่เหล็ก ( $B = 0$ ) กระแสเบสกับกระแสคอลเลคเตอร์จะมีค่าคงที่ ทำให้แรงดันเอาต์พุต ( $V_{BC}$ ) ที่วัดได้มีค่าคงที่ แต่เมื่อมีการจ่ายสนามแม่เหล็กตัดผ่านในแนวตั้งฉากกับผิวของอุปกรณ์ ( $B \neq 0$ ) จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะที่ฉีดจากอิมิตเตอร์ ส่งผลให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวเดิม ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้กระแสเบสกับอิมิตเตอร์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ( $\Delta I_B \neq 0$  และ  $\Delta I_C \neq 0$ ) ซึ่งเมื่อวัดแรงดันเอาต์พุตระหว่างขาเบสกับคอลเลคเตอร์ จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ได้ โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้จากสมการ (5.8) ดังนี้

$$\Delta V_{BC} = \Delta I_B \cdot R_B - \Delta I_C \cdot R_C \quad (5.8)$$

จากสมการข้างต้นเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสกับกระแสคอลเลคเตอร์ ซึ่งแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้นี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก (Sensitivity) ของอุปกรณ์ได้จากสมการ (2.35) ดังนี้

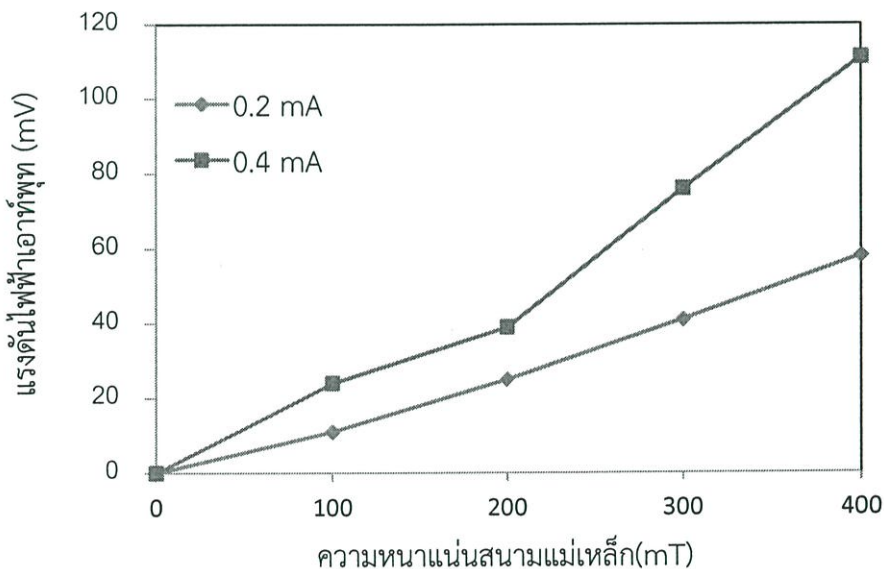
$$S_A = \frac{\Delta V_{BC}}{\Delta B_Z}$$

### 5.3.2 การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง $B_Z$

เราจะทำการวัดสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์โดยให้สนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 400mT แก่ อุปกรณ์และให้กระแสไบอัส 0.2, 0.4 mA ที่ขั้วอิมิตเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ และทำการวัดผลความแตกต่างของแรงดันเอาต์พุตของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แต่ละตัว จากนั้นนำผลความแตกต่างของแรงดันเอาต์พุตจากแต่ละตัวมารวมกันดังสมการ (5.9)

$$\Delta V_{BC(Z)} = \Delta V_{BC(1)} + \Delta V_{BC(2)} + \Delta V_{BC(3)} + \Delta V_{BC(4)} \quad (5.9)$$

รูปที่ 5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับแรงดันเอาต์พุตของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่สนามแม่เหล็กทิศทาง  $B_Z$  ซึ่งผลจากการเปลี่ยนแปลงการฉีตพาหะในสี่ทิศทางเป็นผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย



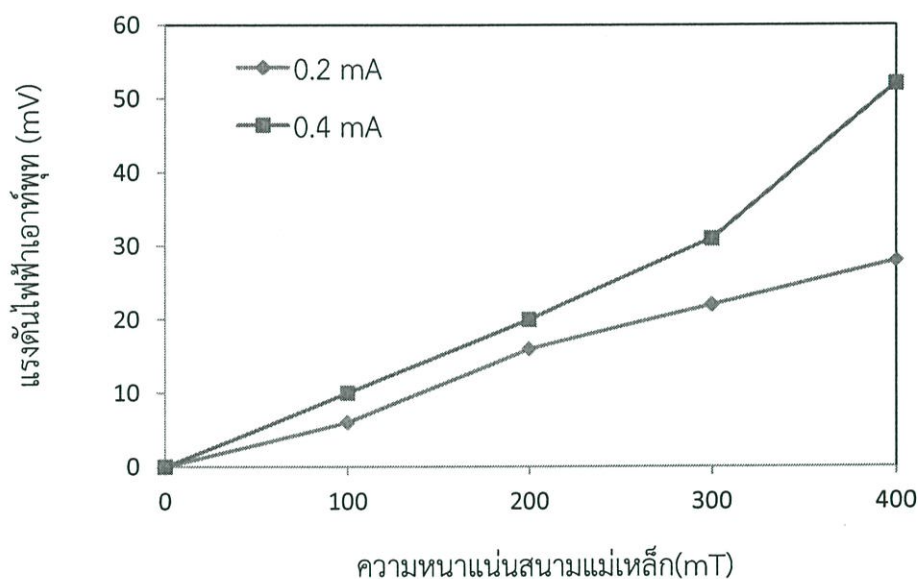
รูปที่ 5.18 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตและความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก  $B_Z$

### 5.3.3 การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน $B_y$

การทดลองทำเช่นเดียวกับการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง  $B_z$  โดยให้สนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 400mT แก่อุปกรณ์และให้กระแสไบอัส 0.2, 0.4 mA ที่ขั้วอิมิตเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ จากนั้นวัดผลความแตกต่างของแรงดันเอาต์พุทของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 4 และนำผลความแตกต่างของแรงดันเอาต์พุทจากแต่ละตัวมารวมกันดังสมการ (5.10)

$$\Delta V_{BC(Y)} = \Delta V_{BC(2)} + \Delta V_{BC(4)} \quad (5.10)$$

รูปที่ 5.19 แสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทิศทาง  $B_y$  ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

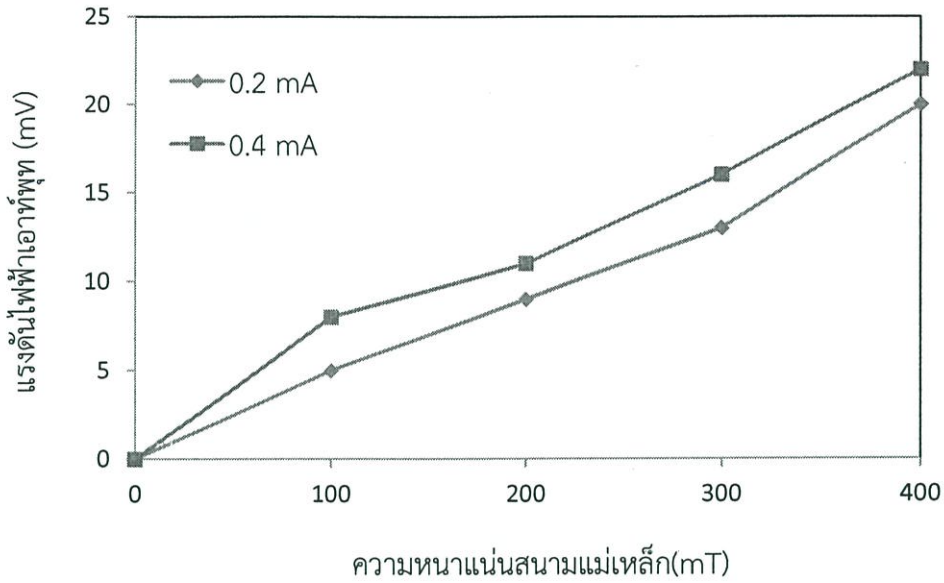


รูปที่ 5.19 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุทและความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก  $B_y$

### 5.3.4 การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน $B_x$

รูปที่ 5.20 แสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทิศทางแกน  $B_x$  ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกนโดยเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 400 mT ทำการทดลองที่กระแสไบอัสอิมิตเตอร์ 0.2 และ 0.4 mA จากนั้นวัดผลความแตกต่างของแรงดันเอาต์พุทของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 1 และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 3 และนำผลความแตกต่างของแรงดันเอาต์พุทจากแต่ละตัวมารวมกันดังสมการ (5.11)

$$\Delta V_{BC(X)} = \Delta V_{BC(1)} + \Delta V_{BC(3)} \quad (5.11)$$



รูปที่ 5.20 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันฮอลล์และความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก  $B_x$

จากผลการทดลองที่ได้สาเหตุที่ค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของการตรวจจับสนามแม่เหล็กแกน X และแกน Y ไม่เท่ากันอาจเกิดจากการจัดตำแหน่งของเซนเซอร์ที่ทำมุมไม่ตั้งฉากจริงกับสนามแม่เหล็ก

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไวของการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่สามารถคำนวณได้ตามสมการ (2.35)

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

กระแสไบอัส $I_E$ (mA)	ค่าความไวในการตอบสนองต่อ สนามแม่เหล็ก (mV/mT)		
	$B_x$	$B_y$	$B_z$
0.2	0.05	0.07	0.145
0.4	0.055	0.13	0.277

จากการคำนวณค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแสดงดังตารางที่ 5.1 การเพิ่มขึ้นของ กระแสไบอัสอิมิตเตอร์สามารถทำให้ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นได้และที่ค่าความไว ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแกน Z มีค่ามากกว่าการตรวจจับสนามแม่เหล็กแกน X และแกน Y เนื่องมาจากว่าการตรวจจับสนามแม่เหล็กแกน Z อุปกรณ์ใช้แมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 ตัวในการ ตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งแตกต่างจากการตรวจจับสนามแม่เหล็กแกน X และแกน Y ที่ใช้เพียงแมกนี โตทรานซิสเตอร์ 2 ตัวเท่านั้น

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลอง

แมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กมักจะมีขาของอุปกรณ์จำนวนมากประมาณ 5 ขา วัดสนามแม่เหล็กได้หนึ่งทิศทางคือทิศทางที่ตั้งฉากกับอุปกรณ์ แต่โครงสร้างในงานวิจัยนี้เป็นอุปกรณ์ที่มีสามขาเหมือนทรานซิสเตอร์โดยทั่วไป การทำงานใช้การเลี้ยงเบนและการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ฉีดจากอิมิตเตอร์ วิ่งผ่านเบสไปยังคอลเลคเตอร์ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ในโครงการนี้ได้นำหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับการตรวจจับสนามแม่เหล็กสามแกน คือแกน X แกน Y และแกน Z เพื่อประยุกต์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในสองมิติและสามมิติ โดยการออกแบบให้กระแสของทรานซิสเตอร์มีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กที่ต้องการตรวจจับ โดยออกแบบให้มีทรานซิสเตอร์สองตัวที่มีอิมิตเตอร์ร่วมกัน จากโครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้สามแกนคือสนามแม่เหล็กตามแนวแกน X ตามแนวแกน Y และตามแนวแกน Z ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถแสดงผลตอบสนองในรูปแบบต่างของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์แปรตามความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามจำนวนขาของโครงสร้างนี้จะมีมากขึ้นอีกสองขาตามแกนทิศทางสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นมาในแกน X และแกน Y ซึ่งโครงสร้างที่มีผู้เคยนำเสนอและวิจัยจะมีจำนวนขามากกว่านี้มากและต้องใช้ทรานซิสเตอร์สี่ตัว

การวิจัยต่อไปคือการนำทรานซิสเตอร์สี่ตัวมารวมกัน โดยการต่อขาเบสทรานซิสเตอร์ร่วมกัน ขาคอลเลคเตอร์ร่วมกัน ส่วนอิมิตเตอร์ออกแบบให้ร่วมกันอยู่แล้ว ปกติโครงสร้างนี้มีขึ้นเพื่อเพิ่มความไวของอุปกรณ์เซนเซอร์ให้มีค่ามากขึ้นตามจำนวนของทรานซิสเตอร์ที่นำมาาร่วมกัน และสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้เพียงทิศทางเดียวคือทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวด้านบนของอุปกรณ์ (แกน Z) แต่อย่างไรก็ตามแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พัฒนาขึ้นจะมีโครงสร้างที่ไม่สมมาตรกล่าวคือในการทำงานปกติการตอบสนองทิศทางสนามแม่เหล็กในแกนเดียวกันจะมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้เมื่อมีสนามแม่เหล็กทิศทางตามแนวแกน X หรือแนวแกน Y ทำให้คู่ทรานซิสเตอร์ที่มีกระแสตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กแต่มีทิศทางตรงข้ามกันหักล้างไม่เป็นศูนย์ ทำให้เกิดค่าผลต่างของกระแสขึ้นแปรตามค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ทำให้การนำทรานซิสเตอร์มาต่อร่วมกันของโครงสร้างนี้สามารถที่จะสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในแนวแกน X แกน Y และแกน Z ซึ่งแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่เคยมีการนำเสนอมาก่อนไม่สามารถทำได้ในสามแกนคือสามารถวัดได้แกน Z เพียงแกนเดียวแต่มีค่าความไวของอุปกรณ์เพิ่มขึ้น ส่วนอุปกรณ์ที่ทำงานวิจัยนี้การตรวจจับสนามแม่เหล็กมีความไวเพิ่มขึ้นและสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในแกน X และแกน Y ได้แต่ความไวจะไม่มากเท่าแกน Z ซึ่งจากผลการทดลองก็ยืนยันเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าว

สำหรับภาพรวมโครงการวิจัยนี้ถือว่าสามารถออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจจับ สนามแม่เหล็กได้สามทิศทางคือแกน X แกน Y และแกน Z ไม่ว่าจะแยกหาทรานซิสเตอร์หรือรวมหา ทรานซิสเตอร์ ซึ่งโครงสร้างที่มีผู้เคยทำวิจัยยังไม่สามารถทำได้ เหตุผลคือการใช้คุณสมบัติของการ ตอบสนองที่ไม่สมมาตรมาใช้งาน และนอกจากนั้นจำนวนขาของอุปกรณ์มีค่าน้อยลงคือมีสามขา เหมือนทรานซิสเตอร์ทั่วไปแต่สามารถตอบสนองทิศทางสนามแม่เหล็กได้สามทิศทางโดยมี ผลตอบสนองในรูปแบบผลต่างของกระแสเบสและคอลเลคเตอร์

สุดท้ายผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติในการสนับสนุน โครงการวิจัยนี้ทำให้บุคลากรสามารถที่จะนำความรู้มาใช้ในการพัฒนางานวิจัย ต่อยอด ในสาขาวิจัย ของตนทำให้เกิดความรู้และทักษะแก่องค์กร นักวิจัย นักศึกษาและในเชิงวิชาการของสาขานั้นๆ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Lj. Ristic, M.T. Doan, M. Paranjape, "2-D integrated magnetic field sensor in CMOS technology," *Circuit Syst.*, pp. 701-704, 1989.
- [2] Agnes Nagy, Hector Trujillo, "3D magnetic-field sensor using only a pair of terminals," *Sensors and Actuators A58.*, 137-140, 1997.
- [3] R.S. Popovic, "The Vertical Hall-Effect Device," *IEEE Electron Devices Lett.*, vol. EDL-5, pp.357-358, 1984.
- [4] Lj. Ristic, T. Smy, H.P. Baltes, "A lateral magnetotransistor structure with linear response to the magnetic field," *IEEE Trans. Electron. Dev.*, ED-36, 1076-1989, 1989.
- [5] Henry P. Baltes, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor," *IEEE Trans. Electron Device.*, vol. 74, pp. 315-317, no. 8, 1986.
- [6] ] R S PopovicSwiss "Series in Sensors Hall Effect Devices Second Edition" Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL)
- [7] ] Lj. Ristic, H.P. Baltes, T. Smy and I. Filanovsky, "Suppressed Sidewall Injection Magnetotransistor with focus Emitter Injection and Carrier Double Deflection,"*IEEE Electron Devices Lett.*, EDL-8, no. 9, pp.395-397, 1987
- [8] H. Trujillo, A. Nagy and J.C. Cruz, " Influence of topology on the response of lateral magnetotransistor," *Sensors and Actuators A45.*, pp. 179-182, 1994.
- [9] S. MIDDELHOEK and S.A. AUDET "Silicon Sensors" ACADEMIC PRESS Harcourt Brace Jovanovich, Publishers London San Diego New York Berkeley Boston Sydney Tokyo Toronto, pp 201-213
- [10] Popovic R S 1989 "Hall-effect devices" *Sens. Actuators* 17 pp. 39-53
- [11] Agnes Nagy and Hector Trujillo, " Highly sensitive magnetotransistor with new topology," *Sensors and Actuators A65.*, pp. 97-100, 1998.
- [12] S. Kordic, "Integrated 3-D Magnetic Sensor Based on an n-p-n Transistor," *IEEE Electron Devices Lett.*, EDL-7, no. 3, pp. 196-198, 1986.
- [13] R.D. Tikhonov, "Sensor on Bipolar Magnetotransistor with the Base in the well," *Solid-State Electronic.*, vol 49, pp. 1302-1308, 2005.
- [14] C.S. Roumenin, "Solid State Magnetic Sensors," ,Elsevier., 1994.
- [15]C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. 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.
- [16] Kazakova O.,Gallop J.C., See P. ; Cox D., Perkins G.K., Moore J.D., Cohen L.F, "Detection of a Micron-Sized Magnetic Particle Using InSb Hall Sensor, " *IEEE Transactions on Magnetics.*, vol.45, issue.10, pp. 4499-4502, 2009.

- [17] Jungmin Kim, Jinyi Lee, Jongwoo Jun, Minhhuy Le, Changhyun Cho, "Integration of Hall and Giant Magnetoresistive Sensor Arrays for Real-Time 2-D Visualization of Magnetic Field Vectors, " *IEEE Transactions on Magnetics.*, vol.48, issue.11, pp. 3708-3711, 2012.
- [18] Ripka P., Janosek, M., "Advances in Magnetic Field Sensors, " *IEEE Sensor Journal.*, vol.10, issue.6, pp. 1108-1116, 2010.
- [19] Segawa T., Yamaguchi Y., Hashimoto H., Kimura M., "Magnetic-field line sensor using poly-Si micro Hall devices , *Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (AM-FPD)*, 2012 19th International Workshop on ., pp. 211-212, 2012.
- [20] Young Jae Min, Chan Keun Kwon, Hoon-Ki Kim, Chulwoo Kim, Soo Won Kim, "A CMOS Magnetic Hall Sensor Using a Switched Biasing Amplifier , " *IEEE Sensor Journal.*, vol.12, issue.5, pp. 1195-1196, 2012.
- [21] Tikhonov R.D., Kozlov A.V., Chernova, Yu.A., Polomoshnov S.A., "Increase sensitivity of the sensor based on bipolar magnetotransistor by minimization initial output offset , " *Control and Communications, 2009. SIBCON 2009. International Siberian Conference on .*, pp. 216-221, 2009.
- [22] Tikhonov R.D., Kozlov A.V., Krasukov A.Yu., Polomoshnov, S.A., Balashov A.G., "Bipolar magnetotransistor sensitivity dependence on temperature , " *Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, 2009. EDM 2009. International Conference and Seminar on.*, pp. 151-153, 2009.
- [23] Kozlov A.V., Tikhonov, R.D., Polomoshnov, S.A., "Development of planar magnetotransistor design by three-dimensional device-technological modeling , " *Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2010 International Conference and Seminar on.*, pp. 208-212, 2010.
- [24] Sung Guo-Ming, Yu Chih-Ping, "Two-Dimensional Differential Folded Vertical Hall Device Fabricated on P-type Substrate Using CMOS Technology , " *IEEE Sensor Journal.*, issue.99, pp. 1, 2013.
- [25] Edelstein A.S., Petrie J.R., Sreenivasulu G., Srinivasan G., Viehland D., Jie Fang, "Magnetoelectric sensors: Sensitive and potentially low-cost magnetic sensors, " *IEEE Sensor 2012*, pp. 1-3, 2012.
- [26] T. Smy and Lj. Ristic, "Optimization of Magnetotransistor Structure in CMOS Technology," *IEEE Trans. Magnetic. Dev.*, vol 28, no. 5, 2024-2030, 1992.
- [27] Radivoje S. Popovic and Rolf Widmer, "Magnetotransistor in CMOS Technology," *IEEE Trans. Electron. Dev.*, ED-33, no. 9, pp. 1334-1340, 1986.
- [19] "Sentaurus Process Used Guide" Synopsis, Version A-2007.12, December 2007.
- [20] "Sentaurus Device Used Guide" Synopsis, Version A-2007.12, December 2007.
- [21] "Sentaurus Structure Editor Used Guide" Synopsis, Version A-2007.12,

ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก.**  
**คุณสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำ**

คุณสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิห้อง (300K)

คุณสมบัติทั่วไป	ซิลิคอน (Si)	เยอรมันเนียม (Ge)	แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs)
น้ำหนักอะตอม	28.09	72.59	144.63
เลขอะตอม, Z	14	32	
ความหนาแน่น, : g/cm <sup>3</sup>	2.33	5.33	5.32
ความหนาแน่นอะตอม, : cm <sup>3</sup>	5.10x10 <sup>22</sup>	4.42x10 <sup>22</sup>	4.4x10 <sup>22</sup>
ลักษณะโครงสร้างผลึก	Diamond	Diamond	Zincblende
จุดหลอมเหลว, : °C	1415	937	1238
ค่าคงตัวแลททิซ, a : nm.	0.543	0.565	0.563
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก, $\epsilon_r$	11.7	16.0	13.1
ความกว้างช่องว่างพลังงาน, E <sub>g</sub> : eV.	1.12	0.66	1.42
ค่า electron affinity, $\chi$ : eV.	4.01	4.13	4.07
สภาพคล่องของอิเล็กตรอน, $\mu_n$ : cm <sup>2</sup> /V-sec	1350	3900	8500
สภาพคล่องของโฮล, $\mu_p$ : cm <sup>2</sup> /V-sec	480	1900	400
ค่าคงที่การแพร่ของอิเล็กตรอน, D <sub>n</sub> : cm <sup>2</sup> / sec	34.6	93	13
ค่าคงที่การแพร่ของโฮล, D <sub>p</sub> : cm <sup>2</sup> / sec	12.3	48.7	80
ความหนาแน่นอินทรินซิก, n <sub>i</sub> : cm <sup>-3</sup>	1.5x10 <sup>10</sup>	2.4x10 <sup>13</sup>	1.8x10 <sup>6</sup>
ความหนาแน่นสถานะที่แถบนำไฟฟ้า, N <sub>c</sub> : cm <sup>-3</sup>	2.8x10 <sup>19</sup>	1.0x10 <sup>19</sup>	4.7x10 <sup>17</sup>
ความหนาแน่นสถานะที่แถบวาเลนซ์, N <sub>v</sub> : cm <sup>-3</sup>	1.0x10 <sup>19</sup>	6.0x10 <sup>18</sup>	7.0x10 <sup>18</sup>

**ภาคผนวก ข.**  
**ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่**

1. Toempong Phetchakul, Samudchad Muangthong, Chana Leepattarapongpan, Amporn 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), 14-17 May, Nakon Ratchasima Thailand, 2014.
2. Toempong Phetchakul, Samudchad Muangthong, Chana Leepattarapongpan, Amporn Poyai “Mechanism of Merged Magnetotransistor” The 36 Electrical Engineering Conference (EECON 36), 11-13 December, Kanchanaburi, Thailand, 2013.

# 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  $\Delta I_{CB}$ . For vertical field detection, the magnetotransistor uses the carrier deflection of the deviation collector current and recombination base current as  $\Delta I_{CB}$ . 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 ( $X_j$ ) 1  $\mu\text{m}$ . The emitter width ( $W_E$ ) of 5  $\mu\text{m}$  is carrier injection path, the base width is 20  $\mu\text{m}$ .

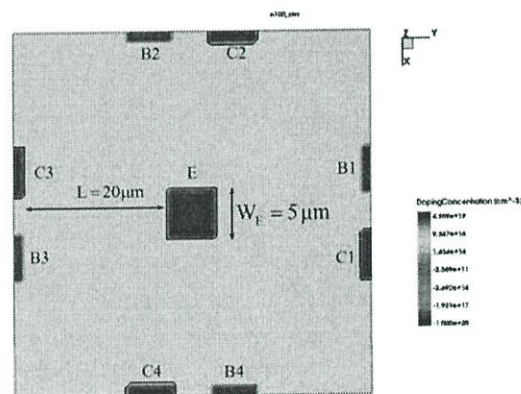


Figure 1. Structure of magnetotransistor in top view.

### 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 ( $\Delta I_{CB}$ ) [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  $\Delta I_{CB} = I_C - I_B = 0$ .

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

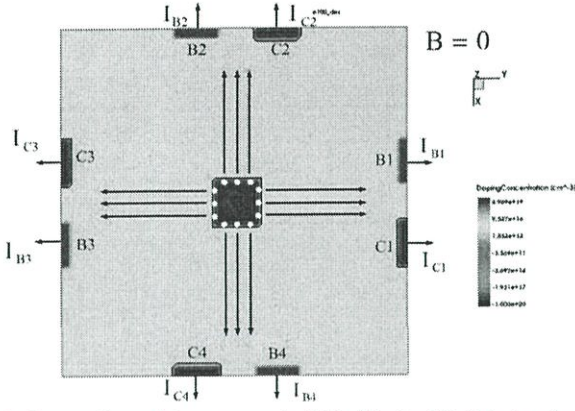


Figure 2. Current flow without magnetic field of device ( $B=0$ ) in top view.

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

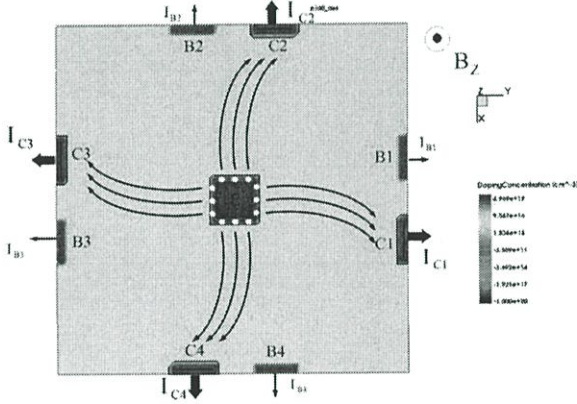


Figure 3. The direction of carrier deflection during detect vertical magnetic field  $B_z$  in top view.

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.

$$\Delta I_{CB(\text{vertical})} = J_{px} \cdot d \cdot L \cdot \mu \cdot B_z \quad (1)$$

where  $J_{px}$  is the current density along x-axis,  $\mu$  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 ( $X_j$ ) 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 ( $B_y$ ).

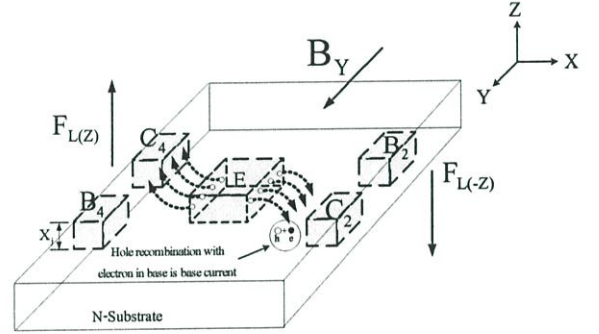


Figure 4. The direction of carrier deflection during detect lateral magnetic field  $B_y$ .

### 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.

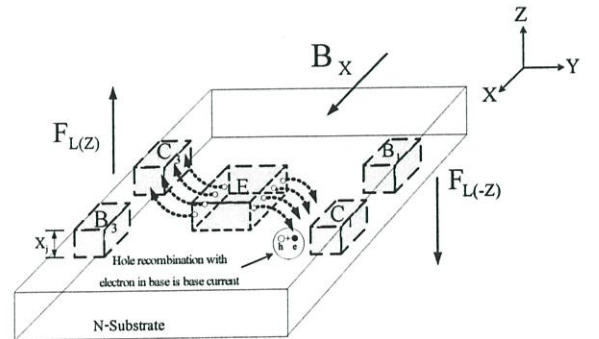


Figure 5. The direction of carrier deflection during detect lateral magnetic field  $B_x$ .

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

#### 4. 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.

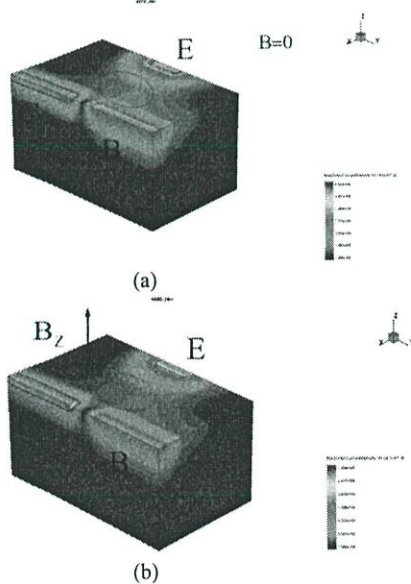


Figure 6. The current density by 3-D model (a) zero magnetic field and (b) vertical magnetic field.

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.

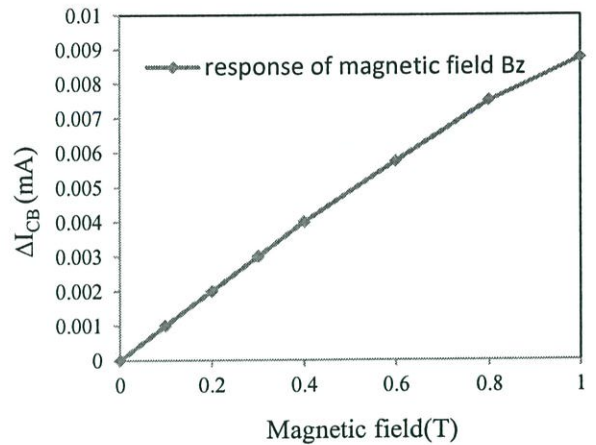


Figure 7. Response of magnetic field in  $z$  direction at  $I_E=5\text{mA}$

#### 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.

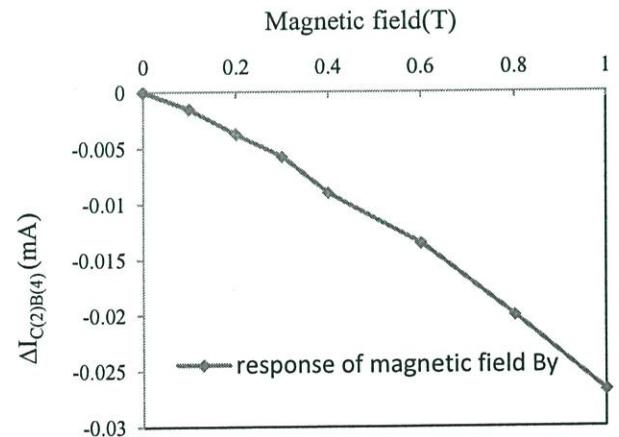


Figure 8. Response of magnetic field in  $y$ -direction at  $I_E=5\text{mA}$ .

#### 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

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.

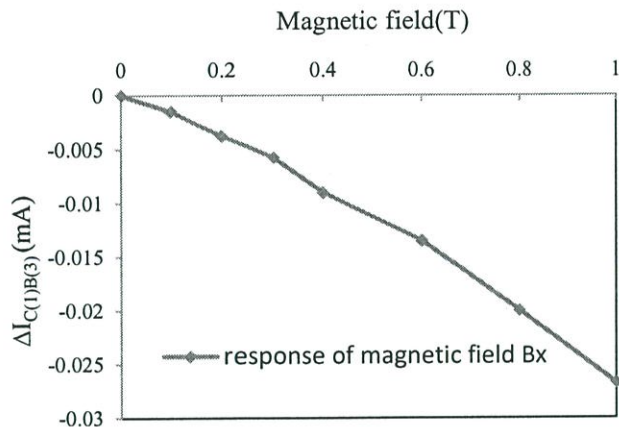


Figure 9. Response of magnetic field in x-direction at  $I_E=5$ mA.

#### 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  $\Delta I_{CB}$ . 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  $I_{B3}$ ,  $\Delta I_{C1B3}$ . The lateral field  $B_Y$  carrier be detected by transistor 2 and 4 as  $\Delta I_{C2B4}$ .

#### 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. Ettl, P. Rey, G. Jourdan, A. Walther, P. Robert, and J. Delamare, “3D Magnetic Field Sensor Concept for Use in Inertial 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, Synopsis, Version A-2007.

## กลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแส Mechanism of Merged Magnetotransistor

สมุจเดช ม่วงทอง<sup>1</sup>, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล<sup>1</sup>, ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์<sup>1</sup>และอัมพร โพธิ์ไชย<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. 0-2329-8344-5 E-mail: zerocustomer@hotmail.com

<sup>2</sup>ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

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

### บทคัดย่อ

ในบทความนี้นำเสนอกลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแส ผ่านการจำลองการทำงานของตัวอุปกรณ์โดยใช้โปรแกรม TCAD Sentaurus อุปกรณ์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้ง 3 แกน (X, Y, Z) การตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์อาศัยผลของการเบี่ยงเบนพาหะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์ โครงสร้างของอุปกรณ์ประกอบไปด้วยอิมิตเตอร์ 1 ตัว เบส 4 ตัวดูถูกต่อกัน และคอลเลกเตอร์ 4 ตัวดูถูกต่อกัน

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 ( $\Delta I_{CB}$ ). 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

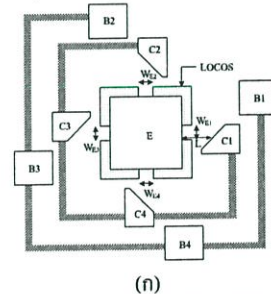
โดยทั่วไปการวัดสนามแม่เหล็ก 3 ทิศทางจำเป็นต้องใช้เซนเซอร์แม่เหล็กหลายตัวซึ่งแต่ละตัวสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้เพียง 1 ทิศทาง โดยการจัดวางให้เซนเซอร์มีทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กทำให้เกิดความยุ่งยากในการใช้งาน แต่แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสที่นำเสนอสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้ 3 ทิศทาง (X, Y, Z) โดยใช้เซนเซอร์เพียง 1 ตัว และมีค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่สูงเพราะเป็นโครงสร้างแบบรวมกระแส ซึ่งแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ

รวมกระแสทั่วไปไม่สามารถวัดสนามแม่เหล็กใน 3 ทิศทางได้ แต่แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่นำเสนอในบทความนี้สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยใช้ผลของการเบี่ยงเบนพาหะเนื่องจากแรงลอเรนซ์ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) [1-4]

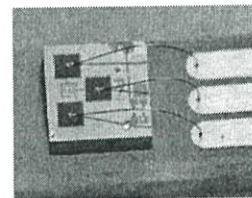
จากบทความก่อนหน้า [2] ได้อธิบายถึงการศึกษาเบื้องต้นและคุณสมบัติต่างๆ ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสอาทิเช่นเป็นโครงสร้างที่มีการพัฒนาขึ้นมาจากโครงสร้างเดิมที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้เพียง 1 หรือ 2 ทิศทางโดยอาศัยเทคโนโลยีการสร้างซิมอส ตัวอุปกรณ์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ 3 ทิศทาง ( $B_x, B_y, B_z$ ) ในบทความนี้จะอธิบายถึงกลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแส (Merged Magnetotransistor) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแกนต่างๆ ( $B_x, B_y, B_z$ ) และอธิบายถึงการเคลื่อนที่ของพาหะในสนามแม่เหล็กทิศทางต่างๆ โดยใช้วิธีการจำลองแบบโดยโปรแกรม TCAD Sentaurus [5]

## 2. โครงสร้างและหลักการทำงาน

### 2.1 โครงสร้างของอุปกรณ์



(ก)

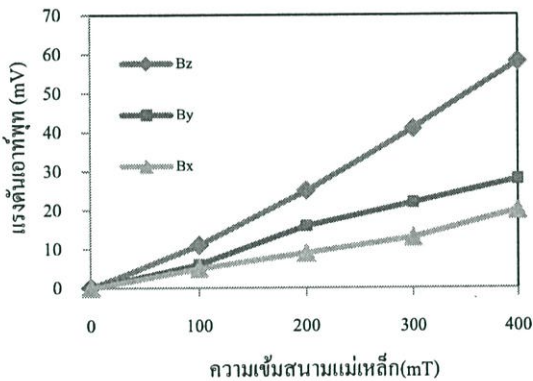


(ข)

รูปที่ 1 โครงสร้างของอุปกรณ์ (ก) มุมมองด้านบนและ (ข) หลังจากสร้างเสร็จแล้ว

โครงสร้างของเมกนีโททรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสแสดงดังรูปที่ 1 เป็นเมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดพี-เอ็น-พี อิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์ถูกได้ปด้วยอะตอมสารเจือโบรอน (ชนิดพี) และเบสถูกได้ปด้วยอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส (ชนิดเอ็น) อุปกรณ์ถูกสร้างขึ้นบนฐานรองชนิดเอ็น โครงสร้างของอุปกรณ์ประกอบไปด้วย อิมิตเตอร์ (E) 1 ขั้ว คอลเลกเตอร์ (C) 4 ขั้ว และเบส (B) 4 ขั้ว เบสแต่ละขั้วถูกต่อรวมกันเป็น 1 ขั้วและคอลเลกเตอร์ทำการต่อรวมเช่นเดียวกัน ชั้นออกไซด์หนา (LOCOS oxide) ถูกสร้างขึ้นล้อมรอบอิมิตเตอร์โดยมีความกว้างของอิมิตเตอร์ ( $W_E$ ) 5 ไมโครเมตร ระยะระหว่างอิมิตเตอร์และคอลเลกเตอร์ออกแบบให้มีขนาด 20 ไมโครเมตร คอลเลกเตอร์แต่ละขั้วถูกออกแบบให้ด้านหนึ่งมีความเอียง 45 องศา แสดงได้ดังรูปที่ 1(ก) และในรูปที่ 1(ข) แสดงรูปเมกนีโททรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบรวมกระแสที่ทำการสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว

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

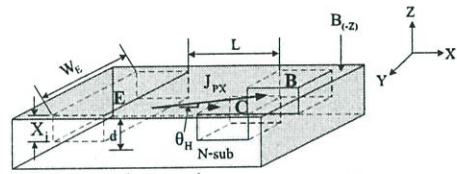


รูปที่ 2 กราฟผลการวัดสนามแม่เหล็ก 3 ทิศทาง(x, y, z) ของเมกนีโททรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสที่สร้างขึ้น[2]

### 2.2 หลักการทำงานเบื้องต้น

เมกนีโททรานซิสเตอร์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในแนวตั้งและแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยโครงสร้างการทำงานเบื้องต้นของเมกนีโททรานซิสเตอร์ ประกอบไปด้วยอิมิตเตอร์ เบสและคอลเลกเตอร์ การทำงานเบื้องต้นของเมกนีโททรานซิสเตอร์ใช้หลักการเบี่ยงเบนของพาหะ (โฮล) เนื่องจากแรงลอเรนซ์ขณะที่มีสนามแม่เหล็กผ่านตัวอุปกรณ์ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์ ( $\Delta I_{CB}$ ) การตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทางแนวตั้ง ( $B_{z}$ ) ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ในทิศทาง  $-y$  การเบี่ยงเบนเกิดขึ้นที่ขั้วเบสและคอลเลกเตอร์ โดยความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์คือ  $\Delta I_{CB}$ , กระแสพาหะโฮล คือ  $J_{px}$ , ความกว้างของอิมิตเตอร์คือ  $W_E$ , ความลึกของรอยต่อคือ  $X_p$ , ระยะการเบี่ยงเบนคือ  $L$

และมุมเบี่ยงเบนคือ  $\theta_H$  โดยสนามแม่เหล็ก ( $B_{z}$ ) มีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางกระแส



รูปที่ 3 การเบี่ยงเบนของพาหะ (โฮล)

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

$$I_E = J_{px} \cdot W_E \cdot d \tag{1}$$

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

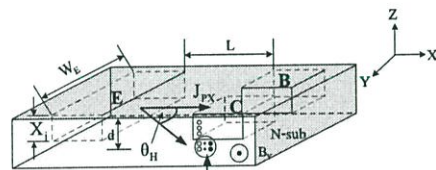
การเบี่ยงเบนของกระแสพาหะเนื่องจากแรงลอเรนซ์ไปจากทิศทางเดิมเป็นมุม  $\theta_H$  โดยมุมของการเบี่ยงเบนขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ค่าสภาพความคล่องของพาหะ ( $\mu_p$ ) และค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ซึ่งแสดงความสัมพันธ์นี้ได้ดังสมการที่ 2

$$\tan \theta_H = \mu_p \cdot B_z \tag{2}$$

การเบี่ยงเบนของกระแสพาหะที่เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์ โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3

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

เช่นเดียวกันในรูปที่ 4 แสดงการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวนอน ( $B_y$ ) ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์และการเบี่ยงเบนของโฮลในทิศทาง  $-z$



การรวมตัวของโฮลและอิเล็กตรอนในเบสกลายเป็นกระแสเบส

รูปที่ 4 การตอบสนองของพาหะ (โฮล) ขณะมีสนามแม่เหล็กแนวนอน

ความแตกต่างระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์ในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวนอนสามารถวิเคราะห์ได้ตามสมการเดียวกับการตอบสนองสนามแม่เหล็กแนวตั้ง

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

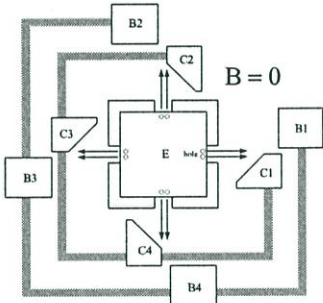
$$S_R = \frac{\Delta I_{CB}}{I_E \cdot \Delta B_Z} \tag{4}$$

$$S_A = \frac{\Delta V}{\Delta B_Z} \tag{5}$$

**3. กลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแส**

แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสมีความสามารถในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในทิศทางแกน  $B_z$ ,  $B_y$  และ  $B_x$  การทำงานพื้นฐานของตัวอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 5 โครงสร้างดังรูปช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กโดยการต่อรวมกันของเบส 4 ขั้วและคอลเลกเตอร์ 4 ขั้วเป็นเบส 1 ขั้วและคอลเลกเตอร์ 1 ขั้ว แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสสามารถฉีดพาหะได้ใน 4 ทิศทาง ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์จะเท่ากัน ( $\Delta I_{CB} = 0$ ) และสามารถแสดงผลต่างของกระแสได้ดังนี้

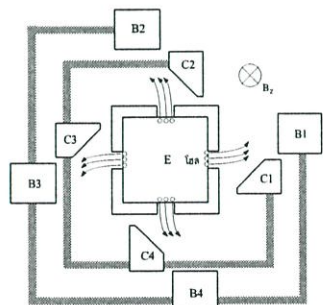
$$\Delta I_{CB(\text{total})} = (I_{C1} + I_{C2} + I_{C3} + I_{C4}) - (I_{B1} + I_{B2} + I_{B3} + I_{B4}) \tag{6}$$



รูปที่ 5 การฉีดพาหะขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก ( $B=0$ )

**3.1 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้ง :  $B_z$**

ในรูปที่ 6 แสดงการตรวจจับสนามแม่เหล็กของทิศทางแนวตั้ง  $B(-z)$  และการเบี่ยงเบนพาหะใน 4 ทิศทาง ผลของการเบี่ยงเบนพาหะทำให้กระแสเบสเพิ่มขึ้นและกระแสคอลเลกเตอร์ลดลง ( $\Delta I_{CB} \neq 0$ ) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเบสและคอลเลกเตอร์แต่ละคู่มีค่าเหมือนกันจากการออกแบบให้คอลเลกเตอร์มีมุม  $45^\circ$  ทำให้เพิ่มโอกาสเกิดการรวมตัวของพาหะมากขึ้น ด้วยเหตุนี้กระแสเบสจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย



รูปที่ 6 ทิศทางการเบี่ยงเบนของพาหะขณะมีสนามแม่เหล็กแนวตั้งแกน  $z$

สมการที่ 7 แสดงผลรวมของ  $\Delta I_{CB}$  จากขั้วเบสและคอลเลกเตอร์ทั้ง 4 คู่ และในสมการที่ 8 แสดงค่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น 4 เท่า

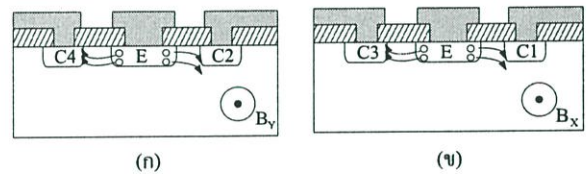
$$\Delta I_{CB(-z)} = (\Delta I_{C1} + \Delta I_{C2} + \Delta I_{C3} + \Delta I_{C4}) - (\Delta I_{B1} + \Delta I_{B2} + \Delta I_{B3} + \Delta I_{B4}) \tag{7}$$

$$S_R = \frac{4 \cdot \Delta I_{CB}}{I_E \cdot \Delta B_Z} \tag{8}$$

**3.2 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวอน :  $B_y, B_x$**

การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน  $B_y$  ทำให้มีแรงลอเรนซ์กระทำในทิศทางแกน  $z$  การเบี่ยงเบนของพาหะเกิดขึ้นที่ขั้ว  $B(2)-C(2)$  ในทิศทาง  $-z$  และขั้ว  $B(4)-C(4)$  ในทิศทาง  $z$  ในรูปที่ 7(n) แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะและในสมการที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทาง  $B_y$

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



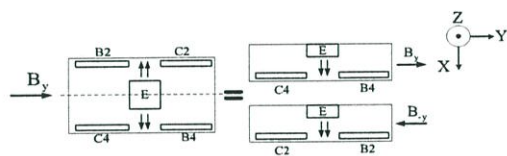
รูปที่ 7 ทิศทางการเบี่ยงเบนของพาหะขณะมีสนามแม่เหล็กแนวอน (n)  $B_y$  และ (จ)  $B_x$

การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอน  $B_x$  ทำให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนขึ้นที่ขั้ว  $B(1)-C(1)$  ในทิศทาง  $-z$  และที่ขั้ว  $B(3)-C(3)$  เกิดการเบี่ยงเบนในทิศทาง  $z$  ในรูปที่ 7(จ) แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะและในสมการที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ของการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทาง  $B_x$

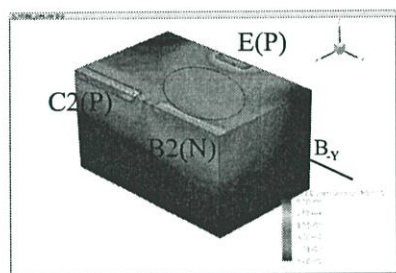
$$\Delta I_{CB(x)} = (\Delta I_{C1} + I_{C2} + \Delta I_{C3} + I_{C4}) - (\Delta I_{B1} + I_{B2} + \Delta I_{B3} + I_{B4}) \tag{10}$$

กลไกการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวอน ( $B_y$ ) ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ขั้ว  $B(2)-C(2)$  และขั้ว  $B(4)-C(4)$  พาหะโฮลที่ขั้ว  $B(2)-C(2)$  เกิดการเบี่ยงเบนในทิศทาง  $-z$  (ดังรูปที่ 7(n)) จากการรวมตัวของโฮลและอิเล็กตรอนในฐานรองซึ่งมีชนิดเหมือนเบสทำให้เกิดเป็นกระแสเบส ( $I_{B2}$ ) และเนื่องจากโครงสร้างมีความลึกกรวยต่อ (Xj) ที่ตื้น ทำให้โฮลเปลี่ยนแปลงมุมเบี่ยงเบนเพียงเล็กน้อยสามารถไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ฐานรอง ส่งผลให้กระแสคอลเลกเตอร์ ( $I_{C2}$ ) ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยลง ขณะที่เกิดสนามแม่เหล็กทิศทาง  $y$  พาหะที่ขั้ว  $B(4)-C(4)$  เกิดการเบี่ยงเบนในทิศทาง  $z$  ทำให้กระแสเบส ( $I_{B4}$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นและกระแสคอลเลกเตอร์ ( $I_{C4}$ ) มีค่าน้อยลง แต่การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นไม่เหมือนกับขั้ว  $B(2)-C(2)$  ความแตกต่างนี้เกิดจากความไม่สมมาตร ผลของการรวมตัวใหม่และการเบี่ยงเบนพาหะของแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสที่มีชนิดการได้ปเหมือนกันระหว่างเบสและฐานรองซิลิคอน

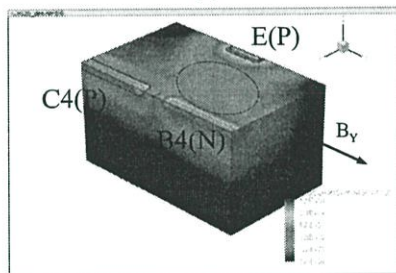
เราสามารถพิสูจน์สมมติฐานได้โดยใช้การจำลองแบบด้วยโปรแกรม TCAD Sentaurus จำลองการทำงานของขั้ว B(2)-C(2) และขั้ว B(4)-C(4) โดยกำหนดให้กระแสมีทิศทางไปตามแกน x และมีสนามแม่เหล็ก 1 เทสลาตั้งฉากกับทิศทางกระแส จากรูปที่ 8 เมื่อกำหนดให้กระแสมีทิศทาง x ที่ขั้ว B(2)-C(2) ต้องให้สนามแม่เหล็กทิศทาง -y เพื่อให้ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเหมือนกับกระแสไหลในทิศทาง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



รูปที่ 8 การกำหนดทิศทางกระแสและทิศทางสนามแม่เหล็กของการจำลองการทำงาน

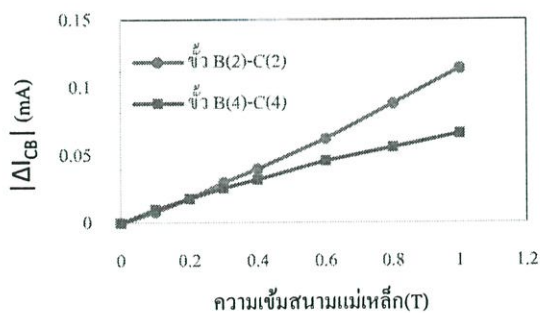


(น)



(ข)

รูปที่ 9 ความหนาแน่นกระแสโดยการจัด 3 มิติของ (น) ขั้ว B(2)-C(2) และ (ข) ขั้ว B(4)-C(4) ขณะมีสนามแม่เหล็กแนวอน



รูปที่ 10 กราฟการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวอน(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 และจากรูปแสดงให้เห็นว่ากระแสที่เพิ่มขึ้นและกระแสคอลเลคเตอร์ที่ลดลงจากขั้ว 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

แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบรวมกระแสมีค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กสูงเนื่องจากมีการรวมกระแสการรีคอมบิเนชันใน 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.Chaowicharut, 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] สมุจเจต ม่วงทอง, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, ชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์, พุทธพล เฟ็งพัด, นริชพันธ์ เป็นผลดี, อาคม ศรีหาแพท, ชาญเดช ทรูอนันต์ และอัมพร โพธิ์โย, "แมกนีโตทรานซิสเตอร์ 3 มิติแบบพลังงานต่ำ โดยอาศัยเทคโนโลยีซีมอส", 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, Synopsys, Version A-2007