

การสร้างและวงจรประยุกต์ใช้งานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์
Fabrication and Application Circuit of Magnetotransistor



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ยืมให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....55500
วัน,เดือน,ปี.....10 พ.ค. 2548

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

การสร้างและวงจรประยุกต์ใช้งานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

Fabrication and Application Circuit of Magnetotransistor



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2546

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสร้างและวงจรประยุกต์ใช้งานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

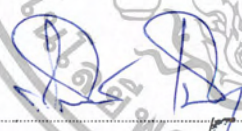
Fabrication and Application Circuit of Magnetotransistor

จัดทำโดย

นายจิรภาค ศิริพงษ์ 44015189

นายสิทธิชัย กิ่งคำ 44015221




.....
(ผศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

ม.เก.จ.อ.เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างและวงจรประยุกต์ใช้งานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

นายจิรภาต ศิริพงษ์ 44015189

นายสิทธิชัย กิ่งคำ 44015221

ผศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

(อาจารย์ที่ปรึกษา)

ปีการศึกษาที่ 2546

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้กล่าวถึงกระบวนการสร้างและวงจรประยุกต์ใช้งานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ที่เป็นโครงสร้างแบบไบโพลาร์ซึ่งเป็นคู่คอลเลคเตอร์ ที่สร้างขึ้นในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แล้วทำการวัดคุณสมบัติในการตรวจจับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก สนามแม่เหล็กทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองไหลไม่เท่ากันซึ่งสามารถจับสัญญาณทางบอห์ที่พูดได้จากความแตกต่างระหว่างขาคอลเลคเตอร์ทั้งสอง (Δ_{V_C}) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามสนามแม่เหล็กที่รับเข้ามา ในส่วนของวงจรประยุกต์ใช้งานนั้นจะเป็นวงจรวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทำการใช้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ อย่างไรก็ตามการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์นี้มิได้มุ่งหวังที่จะทำการแข่งขันในทางอุตสาหกรรม เพียงแต่เป็นการศึกษา วิจัยและเรียนรู้เทคนิคการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ออกมาเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fabrication and Application Circuit of Magnetotransistor

Mr.Jirapat Siripong

Mr.sittichai Kingkham

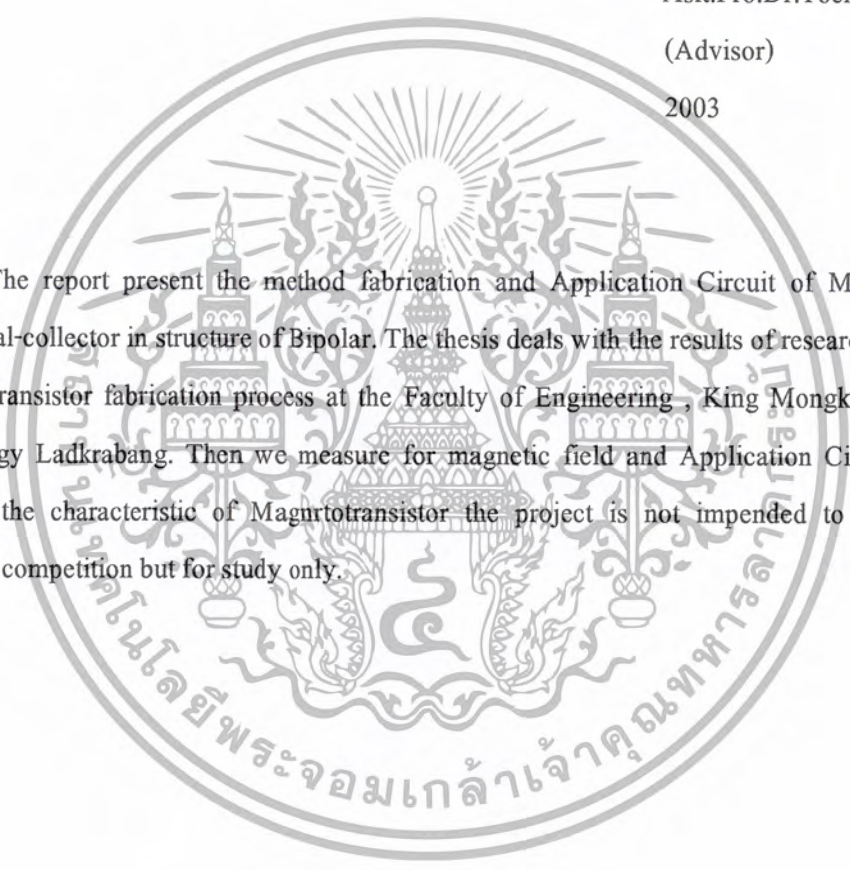
Asit.Pro.Dr.Toempong Petchkul

(Advisor)

2003

Abstract

The report present the method fabrication and Application Circuit of Magnetotransistor which dual-collector in structure of Bipolar. The thesis deals with the results of research. The study of Magnetotransistor fabrication process at the Faculty of Engineering , King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. Then we measure for magnetic field and Application Circuit . We also compare the characteristic of Magurttotransistor the project is not impended to fabrication for industrial competition but for study only.



สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1-2
บทที่ 2 ทฤษฎีแมกนีโตทรานซิสเตอร์	3-17
2.1 ปราคฏการณ์กัลวานอร์แมกเนติก	3
2.2 ปราคฏการณ์ฮอลล์	8
2.3 คุณสมบัติแมกเนติกเซมิคอนดักเตอร์ที่ดี	10
2.6 แมกนีโตทรานซิสเตอร์	10
บทที่ 3 ทฤษฎีและกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	18-25
3.1 กระบวนการออกซิเดชัน	18
3.2 กระบวนการได้ปัสสาว์เจือด้วยกระบวนการแพร่	20
3.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	21
3.4 ฟิสิกส์โพชัน	22
3.5 การทำอีวโพลีชัน	22
3.6 ขบวนการแอนลอยและแอนนีก	24
3.7 การตัดแยกแผ่นผลึก	24
บทที่ 4 การออกแบบแมกนีและการสร้าง	26-40
4.1 การออกแบบ	26
4.2 การออกแบบมาร์ค	28
4.3 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์	30
4.4 วงจรประยุกต์ใช้งาน	32
บทที่ 5 การวัดและการทดลอง	41-52
บทที่ 6 บทสรุป	53-55

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก	56
ภาคผนวก ข	57
ภาคผนวก ค	58-65
ภาคผนวก ง	66-76
ภาคผนวก จ	77-82
ภาคผนวก ฉ	83-85
กิตติกรรมประกาศ	86
บรรณานุกรม	87



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงแรงดันฮอลล์ระหว่างขั้ว 1 กับ 2 และทิศทางของกระแส	6
รูปที่ 2.2 แสดงปรากฏการณ์ของฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำหน้าที่จากรูปโฮลพาหะส่วนมาก	8
รูปที่ 2.3 แสดงแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดต่างๆ	11
รูปที่ 2.4 รูปแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในแนวตั้ง	12
รูปที่ 2.5 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีกระแสไหลตามขวาง	13
รูปที่ 2.6 โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในโรงงาน	16
รูปที่ 2.7 การไปฮัสให้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์	16
รูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของออกไซด์ และระยะที่ใช้ในการออกซิเดชันแบบแห้ง	18
รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของออกไซด์ และระยะที่ใช้ในการออกซิเดชันแบบชื้น	19
รูปที่ 3.3 แสดงเตาที่ใช้ในกระบวนการออกซิเดชัน	20
รูปที่ 3.4 แสดงการแพร่โดยใส่แผ่นซิลิกอนเข้าไปในเตาแพร่สารเจือ	21
รูปที่ 3.5 แสดงหลอดสูญญากาศที่ใช้ในกระบวนการเคลือบโลหะในสูญญากาศ (Evaporation)	23
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์	27
รูปที่ 4.2 มาร์คที่ 1 มาร์คเบส	28
รูปที่ 4.3 มาร์คที่ 2 มาร์คคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์	29
รูปที่ 4.4 มาร์ควินโดว์	29
รูปที่ 4.5 มาร์คอะลูมิเนียม	30
รูปที่ 4.6 แสดงกระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์	31
รูปที่ 4.7 Block Diagram ของวงจร	32
รูปที่ 4.8 วงจร Offset Trimming ที่ใช้กับ INA 2126	33
รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างภายในของ Amplifier เบอร์ INA2126	33
รูปที่ 4.10 โครงสร้างของ ADC 0804 และการจัดวางขา	34
รูปที่ 4.11 ผังเวลาในการทำงานของ A/D	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.12 การต่อ A/D เข้ากับ MCS-51	36
รูปที่ 4.13 การเชื่อมต่อกับ LCD มอดูล	37
รูปที่ 4.14 ภาพขา LCD module	37
รูปที่ 4.15 วงจร Power Supply	38
รูปที่ 4.16 แสดง Flow chart ในการควบคุม MCS-51	40
รูปที่ 5.1 แสดงการต่ออุปกรณ์ที่ใช้กับ Transistor – Curve Tracer ในการวัดคุณสมบัติรอยต่อ P-N และคุณสมบัติไบโพลาร์	42
รูปที่ 5.2 แสดงกราฟคุณสมบัติของรอยต่อ P-N	43
รูปที่ 5.3 แสดงรูปกราฟคุณสมบัติไบโพลาร์แบบคอมมอนอิมิตเตอร์	45
รูปที่ 5.4 แสดงรูปกราฟคุณสมบัติไบโพลาร์แบบคอมมอนเบส	46
รูปที่ 5.5 แสดงการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดผลการตอบสนองแม่เหล็ก ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์	47
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน ΔV กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก $I_E=100\mu A$ $W=20\mu m$ $L=20\mu m$	48
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน ΔV กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก $I_E=300\mu A$ $W=20\mu m$ $L=20\mu m$	48
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน ΔV กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก $I_E=100\mu A$ $W=20\mu m$ $L=10\mu m$	49
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน ΔV กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก $I_E=300\mu A$ $W=20\mu m$ $L=10\mu m$	49
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน ΔV กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก $I_E=100\mu A$ $W=10\mu m$ $L=20\mu m$	50
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน ΔV กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก $I_E=300\mu A$ $W=10\mu m$ $L=20\mu m$	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

- รูปที่ 5.12 แสดงรูปภาพความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีโตทรานซิสเตอร์
กับวงจรประยุกต์ใช้งานเมื่อ $I_E=100\mu A$ และ $V_{B2}=10V$ ที่พารามิเตอร์ค่าต่างๆ 51
- รูปที่ 6.1 แสดงรูปร่างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ 53



บทที่ 1

บทนำ

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กมีอยู่หลายชนิด ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โครงการนี้ใช้สารกึ่งตัวนำในการตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งใช้หลักการของ แรงลอเรนซ์ (Lorentz force) จากปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effects) ที่กระทำต่อประจุพาหะสามารถสร้างเป็นอุปกรณ์ เซนเซอร์ได้หลายชนิดเช่น อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Device) แมกนีโตริซิสเตอร์ (Magnetoresistor) แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode) และ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor) ปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นปรากฏการณ์สำคัญ ในการอธิบายการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กเหล่านี้

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กทั้งหมดนี้ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจ แมกนีโตทรานซิสเตอร์แบ่งตามลักษณะการไหลของกระแสแบ่งได้เป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีกระแสไหลตามแนวนอน (Lateral magnetotransistor) เซนเซอร์สนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ที่มีกระแสไหลในแนวตั้ง (Vertical magnetotransistor) จะเป็นเซนเซอร์แม่เหล็กตามแนวนอน แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ดีจะสามารถขยายสัญญาณได้ดีและมีความไวในการเซนเซอร์สนามแม่เหล็กดี

ในโครงการนี้ได้ศึกษาแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน (Lateral magnetotransistor) ใช้เทคโนโลยีการสร้างแบบไบโพลาร์จังก์ชันคอลลคเตอร์ ตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก ซึ่งสามารถวัดและทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เกี่ยวกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ได้ง่ายและสะดวกกว่าแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวนอน

ในปัจจุบันเทคโนโลยีได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็วมาก แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถสร้างเป็นวงจรรวม (IC) การเรียนรู้ การออกแบบและการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์จะเป็นพื้นฐานที่ดีในการศึกษาเทคโนโลยีระดับสูงต่อไปในอนาคต

ลักษณะของ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ ที่สร้างขึ้นมีรูปลักษณ์สี่เหลี่ยมผืนผ้า ภายในประกอบด้วย 5 ขั้ว โดยมี ขั้วของเบส 2 ขั้ว คอลเลคเตอร์ 2 ขั้ว และ อิมิตเตอร์ 1 ขั้ว โดยทำการออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ จำนวน 4 แบบ โดยทำการเปลี่ยนค่าความยาว W และ L จากนั้นจะทำการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ เพื่อนำแมกนีโตทรานซิสเตอร์ไปประยุกต์ใช้งานเป็นแมกเนติกเซนเซอร์

เนื้อหาจะกล่าวถึง

1. ปฏักฎการณ์กัถวานอร์เมกเนติก , ปฏักฎการณ์ฮอลล์ , คุณสมบัติของเมเนติกเซนเซอร์ที่ดี และ เมกนีโตทรานซิสเตอร์
2. ทฤษฎีและกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ
3. การออกแบบและการสร้าง
4. การวัดคุณสมบัติรอยต่อ P-N , การตรวจวัดคุณสมบัติไบโพลาร์ , ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของเมกนีโตทรานซิสเตอร์กับวงจรประยุกต์ใช้งาน
5. บทสรุป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

อุปกรณ์จำพวกแมกเนติก เซนเซอร์ ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ โดยทั่วไปแล้วจะทำให้เกิดปรากฏการณ์หนึ่งๆที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์กัลวานอร์แมกเนติก (Galvanomagnetic effects)” หรือ “ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effects)” และนำปรากฏการณ์ดังกล่าวที่เกิดขึ้นไปใช้งาน ดังนั้น ปรากฏการณ์กัลวานอร์แมกเนติก จะเป็นขั้นพื้นฐานในการศึกษาของโครงการนี้

2.1 ปรากฏการณ์กัลวานอร์แมกเนติก (Galvanomagnetic effects)

ในทางทฤษฎีนี้ จะสมมุติคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) ในขณะที่ยังไม่ได้จ่ายสนามแม่เหล็ก ความหนาแน่นกระแส $J_n(0)$ จะเกิดขึ้นจากกระแสการแพร่ (Diffusion) และกระแสที่เกิดจากสนามไฟฟ้า (Drift) ซึ่งจะอธิบายด้วยการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ จากการประมาณด้วยสมการของ Boltzman

$$J_n(0) = \sigma_n \cdot \varepsilon + q \cdot D_n \cdot \nabla n \quad 2.1$$

โดยที่ $\sigma_n = q \cdot \mu_n \cdot n$ เป็นค่าความนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก

$\varepsilon = \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ เป็นสนามไฟฟ้า

n = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

$\mu_n = \frac{V_n}{|\varepsilon|}$ ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน

V_n = ความเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอน

∇ = Gradient

เมื่อจ่ายสนามไฟฟ้าเกิดแรงกระทำต่ออนุพาหะเรียกว่า แรงลอเรนซ์ (Lorentz)

$$F = q(v \times B) \quad 2.2$$

โดยที่

v = ความเร็วของอิเล็กตรอน

B = สนามแม่เหล็ก

พิจารณาแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) เกิดขึ้นในทิศทางเดียว ตัดกระแสกระเจิงของอิเล็กตรอน ทำให้ความหนาแน่นกระแสในขณะที่ย้ายสนามแม่เหล็กได้

$$J_n = J_n(0) - \mu_n J_n(B) \times B \quad 2.3$$

$J_n(B)$ เป็นความหนาแน่นของกระแสในขณะที่มีสนามแม่เหล็ก
ทำการ Scalar product แล้วจัดสมการใหม่

$$J_n(B) = \left[J_n(0) + \mu_n B \times J_n(0) + \mu_n^2 B^2 \right] \left[1 + \mu_n B \right]^{-1} \quad 2.4$$

ในสารกึ่งตัวนำ พลังงานการแพร่กระจายของอิเล็กตรอน จะขึ้นอยู่กับกลไกการแพร่ผลที่สามารถอธิบายในรูปของตัวแปร τ_H ซึ่งเรียกว่า แฟกเตอร์ฮอลล์ (Hall Factor) โดยมีค่าขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ สนามแม่เหล็กและตัวแปรอื่นและสามารถหาค่า τ_H ได้

$$\tau_H = \frac{\langle \tau^2 \rangle}{\langle \tau \rangle^2} \quad 2.5$$

$$\langle \tau \rangle = \frac{\frac{4}{3\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \tau(E) E^{3/2} \exp(-E/k_s T) dE}{\int_0^{\infty} E^{3/2} \exp(-E/k_s T) dE} \quad 2.6$$

$$\langle \tau^2 \rangle = \frac{\frac{4}{3\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \tau^2(E) E^{3/2} \exp(-E/k_s T) dE}{\int_0^{\infty} E^{3/2} \exp(-E/k_s T) dE} \quad 2.7$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $\tau(E)$ คือเวลาชั่วขณะ (Momentum Relaxation time)

/ ในทางทฤษฎีแล้วสารกึ่งตัวนำปริมาตรมีค่า $r_n = 1.18$ แต่จากการทดลองในผ่านซิลิกอนชนิดเอ็น $r_n = 1.15$ และชนิดพี $r_p = 0.7$ ที่อุณหภูมิห้องและมีความหนาแน่นต่ำ ค่าแฟกเตอร์ r_n จะมี ผลต่อความคล่องตัวของประจุพาหะ ดังนั้นความคล่องตัวของประจุพาหะฮอลล์ (Hall mobility) มีค่าเป็น

$$\mu_n = r_n \mu_n \quad 2.8$$

เมื่อนำค่า Hall mobility แทนลงในสมการที่ 2.4

$$J_n(B) = \left[J_n(0) + \mu_n B \times J_n(0) + k(\mu_n)^2 B \cdot J_n(0) B \right] \left[1 + (\mu_n B)^2 \right] \quad 2.9$$

k เป็นผลรวมของพลังงานเฉลี่ยสูง

ในสารกึ่งตัวนำรอยต่อแบบโอห์มมิก (Ohmic Contact) และความหนาแน่นของประจุพาหะมีลักษณะการกระจายตัวแบบ Gradient ∇n จะถูกตัดทิ้งทำให้สมการที่ 2.9 ถูกเปลี่ยนเป็น

$$J_n(B) = \sigma_{nB} \left[\varepsilon + \mu_n B \times \varepsilon + k(\mu_n)(B \cdot E) B \right] \quad 2.10$$

ความนำจะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็ก

$$\sigma_{nB} = \sigma_n \left[\varepsilon + (\mu_n B)^2 \right]^{-1} \quad 2.11$$

เมื่อสนามแม่เหล็ก B ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ε ในกรณีของ $B \cdot \varepsilon = 0$ ฉะนั้นความหนาแน่นของกระแสจึงเปลี่ยนไป

$$J_n(B) = \sigma_{nB} \left[\varepsilon + \mu_n B \times \varepsilon \right] \quad 2.12$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสมการที่ 2.12 เป็นการอธิบายปรากฏการณ์การกัลปีวานอร์เมกเนติก สมมติให้สนามไฟฟ้า ϵ และความหนาแน่นของกระแส $J_n(B)$ อยู่ในระนาบ x-y และสนามแม่เหล็กไปทิศทางเดียวกับแกน z ดังนั้น $\epsilon = (\epsilon_x, \epsilon_y, 0)$, $J_n(B) = (J_{nx}, J_{ny}, 0)$ และ $B = (0, 0, B)$ จากสมการที่ 2.12 ได้

$$J_{nx} = \sigma_{nB} \left[\epsilon_x - \mu_n^* B \epsilon_y \right] \quad 2.13$$

$$J_{ny} = \sigma_{nB} \left[\epsilon_y + \mu_n^* B \epsilon_x \right] \quad 2.14$$

ทั้งสองกรณีกล่าวถึงความยาว $L \gg W$ และความกว้าง $W \gg L$ แต่กรณีนี้กล่าวถึง $L \gg W$ ซึ่งความยาว L มีค่าเป็น infinite เพียงอย่างเดียวซึ่งแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแรงดันฮอลล์ระหว่างขั้ว 1 กับ 2 และทิศทางของกระแส

เมื่อพิจารณาเงื่อนไข $W \ll L$ ความหนาแน่นของกระแสจะเกิดในระนาบ x เพียงอย่างเดียว $J_{ny} = 0$ ฉะนั้นจากสมการ 2.13 และ 2.14 จะได้

$$ey = -\mu_n B ex = R_H J_{nx} B \quad 2.15$$

โดยที่

$$R_H = \frac{-\mu_n}{\sigma_n} = \frac{-r_n}{q_n} \quad 2.16$$

ซึ่ง R_H ถูกเรียกว่า สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall Coefficient) โดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารเจือในสารกึ่งตัวนำ สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall field) ทำให้เกิด equip potential lines ขึ้นโดยทำมุม θ_H (Hall angle)

$$\tan \theta_H = \frac{ey}{ex} = -\mu_n B = \sigma_n R_H B \quad 2.17$$

จากสมการที่ 2.16 ทำให้เราทราบว่าความหนาแน่นของประจุพาหะต่ำทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์มีค่ามาก ดังนั้นสารกึ่งตัวนำนิยมใช้มากกว่าโลหะ เมื่อกำหนดให้ Hall plate มีความหนา t และกระแสไหลผ่าน I จะสามารถแสดงแรงดันฮอลล์ (Hall voltage) ได้จากสมการที่ 2.15

$$V_H = \frac{R_H I B}{t} \quad 2.18$$

ผลตอบสนองของความไว (Sensitivity) คือแรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแสของสนามแม่เหล็กจะเป็น

$$S = \frac{V_H}{IB} = \frac{R_H}{t} = \frac{-r_n}{qnt} \quad 2.19$$

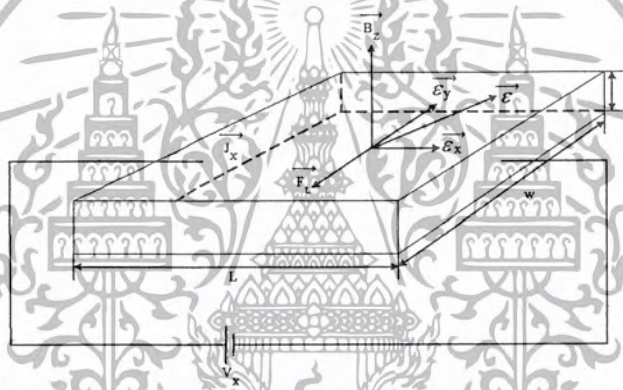
จะเห็นว่า Sensitivity ที่สูงจะมีความหนาแน่นของประจุพาหะมีค่าต่ำและฮอลล์แฟลทจะต้องมีความหนาแน่นน้อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

เป็นปรากฏการณ์ที่ใช้วัดความหนาแน่นของพาหะ ชนิดของพาหะและสภาพคล่องของพาหะ คือขณะที่มีกระแส J_x ไหลผ่านกึ่งตัวนำในทิศทาง $(+X)$ เมื่อในสนามแม่เหล็ก B_z ตัดผ่านในทิศทาง Z โดยตั้งฉากกับทิศทางกระแสจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในทิศทาง Y ซึ่งตั้งฉากกับทั้งทิศทางกระแสและทิศทางของสนามแม่เหล็ก

ตัวอย่างสารกึ่งตัวนำชนิดนี้แท่งหนึ่งมีความยาว L กว้าง W และความยาว D ถูกนำไปต่อกับแหล่งจ่ายแรงมีความต่างศักย์ V_x และโวลต์ทำให้เกิดกระแส J_x ไหลในทิศทาง $+X$ ให้สนามไฟฟ้า B_z ตัดผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำในทิศ Z โดยให้ตั้งฉากกับทิศทางกระแสดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงปรากฏการณ์ของฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำหน้าทีจากรูปโวลพาหะส่วนมาก

เมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า E_x จะมีแรงกระทำต่อประจุ ทำให้สามารถเคลื่อนในทิศทาง $+X$ และมีสนามแม่เหล็ก B_z ตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสจะเกิด มีแรงลอเรนซ์ (Lorentz force) กระทำต่อประจุโดย

$$F_L = qv \times B \quad 2.20$$

ซึ่ง F_L คือแรง ลอเรนซ์และมีขนาดเป็น

$$|F| = qv \times B_z \quad 2.21$$

ทิศทางของแรงลอเรนซ์คือ $-y$ ดังนั้นทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนบนแกน $-y$ และสะสมอยู่บริเวณด้านหน้าของสารกึ่งตัวนำด้านตรงกันข้ามจึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสนามไฟฟ้าภายใน \mathcal{E}_y มีทิศ + สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮลที่กระทำต่อ แรงลอเรนซ์ อยู่ในสภาวะสมดุลและ Stead state ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ไปตรงไปในทิศ $+x$ ได้แสดงว่าแรงลอเรนซ์ F_y และแรงสนามไฟฟ้าภายใน (qE_y) มีค่าเท่ากัน

$$E_H = +V_x B_z \quad 2.22$$

$$J_x = -nqV_x \quad 2.23$$

$$E_H = -\frac{J_x B_z}{nq} \quad 2.24$$

$$E_H W = -\frac{J_x W + B_z}{nqt} \quad 2.25$$

$$V_H = -\frac{I_x B_z}{nqt} \quad 2.26$$

$$R_H = \frac{-1}{nq} \quad 2.27$$

โดย	E	คือ สนามไฟฟ้าในทิศทางตามสัปสกริป
	I	คือ กระแสไฟฟ้าในทิศทางเดียวกันกับสคริป
	B	คือ ความหนาแน่นของแม่เหล็กในทิศทางตามสัปสกริป
	V_H	คือ แรงดันฮอลล์
	R_H	คือ สัมประสิทธิ์ฮอลล์
	N	คือความหนาแน่นของประจุพาหะ
	t	คือ ความหนา
	w	คือ ความกว้าง

2.3 คุณสมบัติของเมเนติกเซนเซอร์ที่ดี

การที่เมเนติกเซนเซอร์ที่ดีนั้นจะมีเกณฑ์ที่สำคัญอยู่หลายอย่างด้วยกันดังนี้คือ

2.3.1 ออฟเซ็ท

เกณฑ์ที่สำคัญของเมเนติกเซนเซอร์ คือการตรวจจับสนามแม่เหล็ก แล้วได้ผลของสัญญาณเอาต์พุท สาเหตุหนึ่งของการกำจัดผลดังกล่าวขึ้นคือ ออฟเซ็ท ซึ่งออฟเซ็ทเป็นค่าสัญญาณเอาต์พุท เมื่อไม่ได้จ่ายสนามแม่เหล็ก ($B=0$)

สาเหตุที่สำคัญของออฟเซ็ทอาจเกิดจาก ความไม่สมบูรณ์ของกระบวนการผลิต (Process technology) การปรับซ็อนมาร์ค (Alignment) กระบวนการบรรจุลงตัวถัง (Packaging) และอายุการใช้งานของเซ็นเซอร์

2.3.2 ความเป็นเชิงเส้น

ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) เป็นค่าแสดงของสัญญาณเอาต์พุท เนื่องจากการเปลี่ยนค่าสัญญาณอินพุท โดยเมื่อสัญญาณอินพุทเปลี่ยนแปลงไปเท่าใดก็ตาม สัญญาณทางเอาต์พุทก็จะเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะของเชิงเส้น

2.3.3 ความไว

ความไว (Sensitivity) คือผลของการตอบสนองของอัตราส่วนระหว่างสัญญาณเอาต์พุทต่อสัญญาณอินพุท ซึ่งค่าความไวเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดที่จะบ่งบอกถึง ความสามารถของเซนเซอร์ ความสามารถในการรับรู้สนามแม่เหล็กที่ดีนั้นจะต้องมีการตอบสนองค่าสัญญาณเอาต์พุทค่ามากๆ ที่ค่าสนามแม่เหล็กต่ำๆ

ค่าความไว ที่มีการ ไปอัสด้วยกระแสจะสามารถหาได้จาก

$$S_I = \frac{V_H}{I \cdot B} = \frac{R_H \cdot G}{t} = \frac{G \cdot r_n}{qnt} \quad 2.28$$

2.6 แมกนีโททรานซิสเตอร์(Magnetotransistor)

แมกนีโททรานซิสเตอร์ (magnetotransistor) เป็นทรานซิสเตอร์ (transistor) ที่มีความสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็ก มีทั้งโครงสร้างไบโพลาร์ (Bipolar) และแบบมอส(Mos) สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ ทั้งในแนวตั้งฉากและแนวอน กลไกการทำงานของแมกนีโททรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor) ถูกออกแบบให้กระแสคอลเลคเตอร์ (collector) แปรเปลี่ยนกับสนามไฟฟ้า แมกนี

โททรานซิสเตอร์ทั่วไปจะมีชิ้นสารกึ่งตัวนำสองชิ้น (dual Collector) ในสภาวะปกติไม่มีสนามแม่เหล็ก แมกนีโททรานซิสเตอร์ จะทำงานเหมือนทรานซิสเตอร์ (Transistor) ปกติทั่วๆ ไป กระแสที่ไหลในคอลเลคเตอร์ (collector) ทั้งสองชิ้นจะมีปริมาณเท่ากัน เมื่อมีสนามแม่เหล็กมาตัดผ่านทิศทางตั้งฉากกับการไหลของกระแส แรงลอเรนซ์ (Lorenz Force) ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กตั้งฉากได้อธิบายในเรื่องปรากฏการณ์ฮอลล์แล้ว เบื้องเบนทิศทางการไหลของกระแสทำให้กรคอลเลคเตอร์ (Collector) ที่ไหลผ่านชิ้นสารกึ่งตัวนำ (collector) มีปริมาณแตกต่างกันโดย $I_c = I_{c1} - I_{c2}$ แมกนีโททรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor) ที่มีขนาดใหญ่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ดีเนื่องจาก มีพื้นที่ดูดซับสนามแม่เหล็กได้หนึ่งมิติ สองมิติและสามมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในปริภูมิพิกัดขั้วขั้วนี้จะสนใจเฉพาะอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบกระแสไหลนอน (Lateral Magnetotransistor) โครงสร้างไบโพลาร์คู่ออกคอลเลคเตอร์ (Bipolar Dual Collector) เท่านั้น



รูปที่ 2.3 แสดงแมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดต่างๆ

2.6.1 แมกนีโททรานซิสเตอร์ที่มีกระแสไหลทางแนวตั้ง (Vertical Magnetotransistors)

รูปที่ 2.4 แสดงรูปอธิบายแมกนีโททรานซิสเตอร์ที่มีกระแสไหลตามแนวตั้งซึ่งเป็นหลักการของวงจรรวมประกอบด้วยทรานซิสเตอร์แบบ N-P-N ทรานซิสเตอร์จะเป็นคู่อิมิตเตอร์และคู่อิมิตเตอร์เบสเป็นโครงสร้างแบบแนวตั้ง จากคอลเลคเตอร์จะสัมผัสส่วนเล็ก N+ และขาคอลเลคเตอร์ทั้งสองจะไม่ขอรัดถึงกัน เมื่อมีสนามแม่เหล็กทางแนวตั้งพาหะส่วนน้อยจะไหลขนานกับพื้นผิว พาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนน้อยที่ฉีดจากความเข้มข้นสูงจากขั้วอิมิตเตอร์จะผ่านบริเวณเบสและผ่านไปยังบริเวณที่ได้ป็นน้อยที่สุดคือขาคอลเลคเตอร์ซึ่งจะเป็นพาหะส่วนใหญ่กระแสจะถูกแผ่ไปยังขาคอลเลคเตอร์ทั้งสองเมื่อยังไม่มีสนามแม่เหล็กอุปกรณ์จะมีปริมาณ และกระแสคอลเลคเตอร์จะเท่ากับ $I_{C1} = I_{C2} = I_{C0}/2$

I_{C0} คือกระแสรวมของคอลเลคเตอร์โดยไม่มีสนามแม่เหล็ก ซึ่งถ้ามีสนามแม่เหล็กแรงลอเรนซ์จะไปเบี่ยงเบนพาหะในเบสจะทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ไม่สมดุลกัน $\Delta I_C = I_{C1} - I_{C2}$ ซึ่งในรูปที่ 2.4 จะแสดงภาคตัดขวางของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีกระแสไหลในแนวตั้ง โดยผลการตอบสนองของความไวจะมีค่าประมาณ

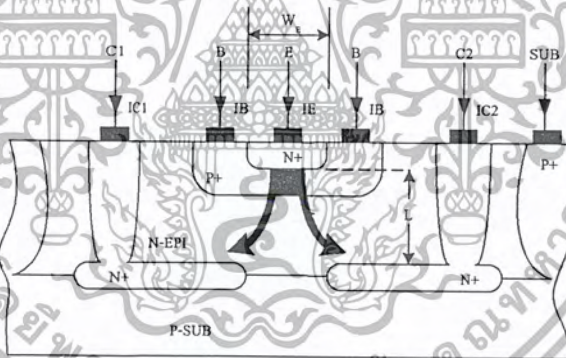
$$S_R \approx 2\mu_n^* L/W_E$$

2.29

เมื่อ

L
W

ระยะห่างระหว่าง อิมิตเตอร์ กับ คอลเลคเตอร์
ความกว้างอิมิตเตอร์

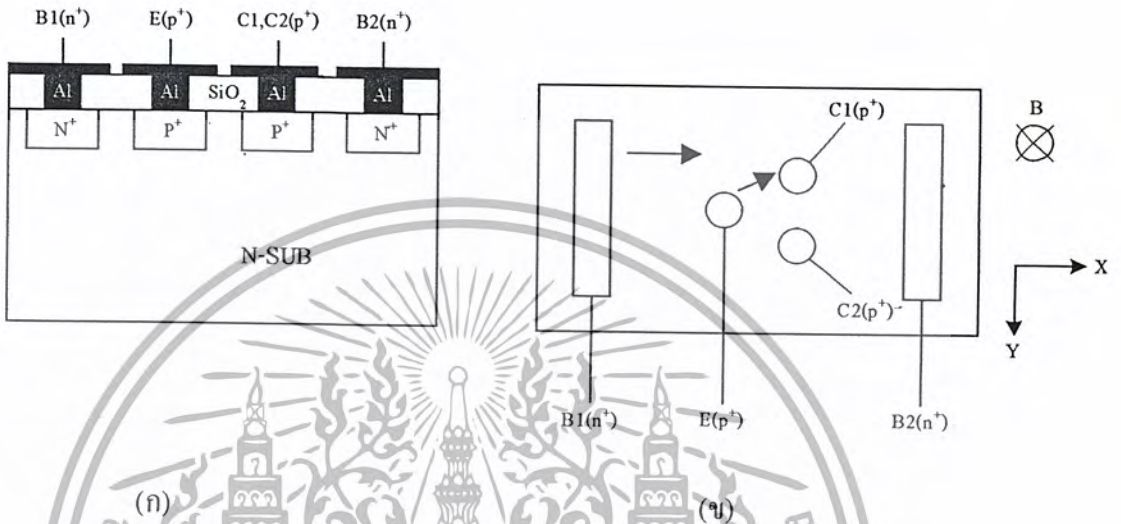


รูปที่ 2.4 รูปแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในแนวตั้ง

2.6.2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์กระแสไหลแนวนอน(Lateral Megmetotransistor)

แมกนีโตทรานซิสเตอร์กระแสไหลแนวนอน(Lateral Megmetotransistor) โดยปกติแล้วจะถูกสร้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มี 5 ขั้ว โดยจะมีเบส 2 ขั้ว คอลเลคเตอร์ 2 ขั้ว และอิมิตเตอร์ 1 ขั้ว และรอยต่อจะเป็นลักษณะแบบโอห์มมิก ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวในแนวตั้งฉาก ซึ่งการเบี่ยงเบนของกระแสเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือแบบ modulation และ deflection ในโครงงานนี้

ลักษณะการเลี้ยวเบนของกระแสคอลเลคเตอร์เป็นแบบ deflection ซึ่งมีลักษณะดังต่อไปนี้ แสดงในรูปที่ 2.5 (ข)



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.5 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีกระแสไหลตามขวาง

(ก) ภาคตัดขวางของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

(ข) การหักเหประจุของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

จากรูปที่ 2.5 เป็นทรานซิสเตอร์ Drift-aided แบบคู่คอลเลคเตอร์ชนิด ซึ่งขาอิมิตเตอร์และขาคอลเลคเตอร์ทั้งสองจะตั้งอยู่ในสารชนิดพี ซึ่งเป็นฮอลล์เพลทขนาบสารชนิดพี จะเป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์สนามแม่เหล็กในแนวตั้งและใช้โครงสร้างแบบไบโพล่าร์ทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้ เมื่อให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในโหมดไบอัสตรงขณะขาเบสกับขาคอลเลคเตอร์ได้รับไบอัส ตรงและขาเบสกับขาคอลเลคเตอร์ได้รับไบอัสกลับ ในช่วงเวลาที่ไม่มีสนามแม่เหล็กที่ขาอิมิตเตอร์จะฉีดพาหะผ่านเบสไปยังขาคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากัน คือ I_{c1} จะเท่ากับ I_{c2} ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $I_c/2$ ซึ่ง I_c คือ กระแสคอลเลคเตอร์รวมทั้งหมด เมื่อมีสนามแม่เหล็กในแนวตั้งจากการฉีดพาหะจากอิมิตเตอร์ถึงคอลเลคเตอร์ทั้งสองจากสมดุลไปเป็นไม่สมดุลเพราะแรงลอเรนซ์ทำให้พาหะส่วนน้อยในเบสเกิดการเบี่ยงเบนทำให้ขาคอลเลคเตอร์ C1 และที่ขาคอลเลคเตอร์ C2 มีกระแสไหลไม่เท่ากันซึ่งเบสคอนแทค B1 กับ B2 จะเป็นสนามไฟฟ้าช่วยเร่งพาหะจากอิมิตเตอร์ไปถึงขาคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ซึ่งเรานำความแตกต่างของขาคอลเลคเตอร์ทั้งสองมาตรวจสอบสนามแม่เหล็กซึ่งจะได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta I_c = I_{c1} - I_{c2} \tag{2.30}$$

$$\Delta I_c = K_g(\mu_p + \mu_n) B z I_e \tag{2.31}$$

โดยที่ K_g เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการไบอัสและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ในอุปกรณ์ที่มีความบางและอุปกรณ์ที่มีความนำต่ำ $K_g \approx 0.7$

ค่าความไวในการตรวจจับแม่เหล็ก

$$S_R = (\mu_p + \mu_n) L / K \tag{2.32}$$

L ระยะห่างระหว่างคอลเลกเตอร์และอิมิตเตอร์

X คือค่าพารามิตเตอร์อยู่ในช่วง $X_{jn} < X < X_{jp}$

2.6.3 ผลของปรากฏการณ์ฮอลล์ในแมกนีโตทรานซิสเตอร์

แมกนีโตทรานซิสเตอร์รูปที่ 2.4 สมมุติให้แมกนีโตทรานซิสเตอร์ทำงานโหมดไบอัสตรง มีสนามไฟฟ้าจาก B1 ไปยัง B2 มีกระแสไหลจากอิมิตเตอร์ไปคอลเลกเตอร์ในปริมาณเท่ากันเมื่อให้สนามแม่เหล็กทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์

$$E_H = J_b \times B \tag{2.33}$$

J_b คือความหนาแน่นของกระแสรวมในเบส

2.6.3.1 ภายใต้งานไบอัสการฉีดพาหะระดับต่ำ

$$R_H = \frac{r_n}{q n b} \quad \text{สำหรับทรานซิสเตอร์ชนิด p-n-p}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$R_H = \frac{r_p}{qnb} \quad \text{สำหรับทรานซิสเตอร์ชนิด p-n-p}$$

โดยที่ p_b และ n_b ความหนาแน่นของประจุพาหะบริเวณ ดั้งนั้นในบริเวณเบสเปรียบเสมือนฮอลล์เพลท

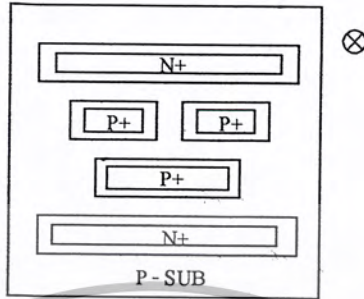
2.6.3.2 ภายใต้เงื่อนไขการฉีดพาหะระดับสูง ให้ประมาณ $p_b \approx n_b$ $r_n \approx r_p \approx 1$

$$R_H \approx (qpb)^{-1} \left(1 - \frac{\mu_n}{\mu_p} \right) \left(1 + \frac{\mu_n}{\mu_p} \right)^{-1} \quad 2.34$$

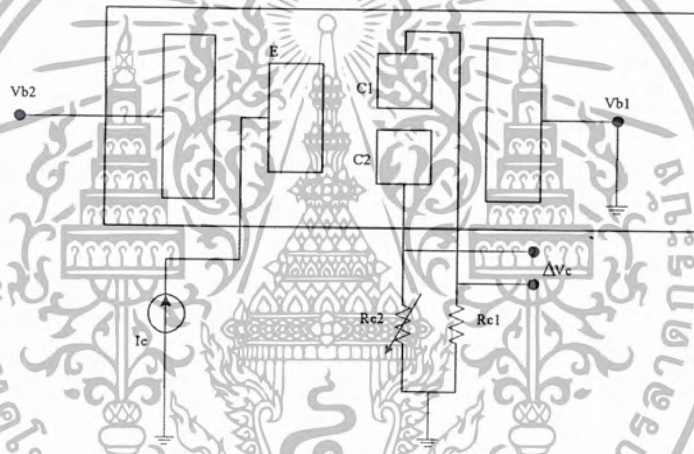
การกระทำของสนามไฟฟ้าฮอลล์จะทำให้ประจุพาหะเกิดการเบี่ยงเบนซึ่งสามารถหามุมได้จาก

$$\theta = \tan^{-1}(\mu_n B) + \tan^{-1}(\mu_p B) \quad 2.35$$

ซึ่งในโครงงานนี้เราจะใช้ทรานซิสเตอร์แบบ p-n-p ซึ่งจากการออกแบบจะเปลี่ยนจากโครงสร้างแบบวงกลมเป็นสี่เหลี่ยมจะ ได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในโรงงาน



รูปที่ 2.6 การไบอัสให้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์

จากรูปจะเห็นว่าขนาดของคอลเลคเตอร์ C1 และ C2 จะต้องเท่ากันและ สมมาตรกันด้วย เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กจะทำให้กระแสคอลเลคเตอร์เท่ากันทำให้แรงดันตกคร่อม R_{c1} กับ R_{c2} เท่ากันทำให้ $\Delta V = 0$ แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กกระแสที่ไหลจากอิมิตเตอร์ไปยังคอลเลคเตอร์ทั้งสองจะเกิดการเบี่ยงเบนทำให้กระแส I_{c1} ไม่เท่ากับกระแส I_{c2} ทำให้เกิด ΔV ขึ้น ซึ่ง ΔV จะเปลี่ยนแปลงตามสนามแม่เหล็กที่รับเข้ามา ความยาวของชั้นสารอิมิตเตอร์ต้องครอบคลุมชั้นสารคอลเลคเตอร์ทั้งสองต้องยาวเท่ากันและขาเบสทั้งสองต้องมีความยาวครอบคลุมชั้นส่วนอุปกรณ์ทุกชั้นเพื่อให้สนามไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับขา B1 และ B2 ครอบคลุมทุกชั้นของอุปกรณ์ ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบคือระยะห่างระหว่างขาอิมิตเตอร์และขาคอลเลคเตอร์ทั้งสองระยะนี้สำคัญ ถ้าระยะห่างมากเกิดไปทำให้การฉีดพาหะจากขาอิมิตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขาอิมิตอร์และขาคอลเลคเตอร์ทั้งสองระยะนี้สำคัญ ถ้าระยะห่างมากเกิดไปทำให้การฉีดพาดจากขาอิมิตอร์จะไปไม่ถึงคอลเลคเตอร์ทั้งสองจึงทำให้ทรานซิสเตอร์ไม่ทำงานและระยะนี้ควรอยู่ในช่วงประมาณ 10-20 μ m พารามิเตอร์ที่สำคัญคือระยะห่างระหว่างขา C1 กับ C2 คือระยะที่เบี่ยงเบนของพาดส่วนน้อยในเบสไปยังขา C1 และ C2 ระยะห่างมากเกินไปจะไม่เบี่ยงเบนกระแสไปยังขา C1 และ C2 ค่าควรจะอยู่ในช่วงประมาณ 10-20 μ m เช่นกัน



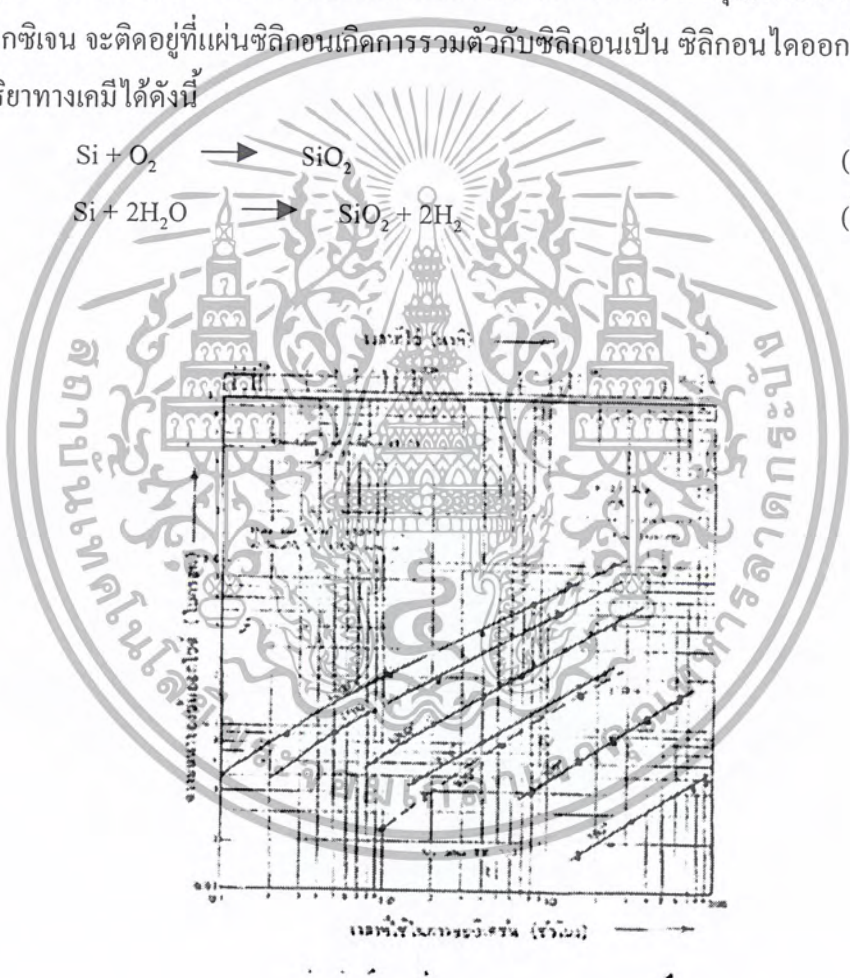
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีและกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

3.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)

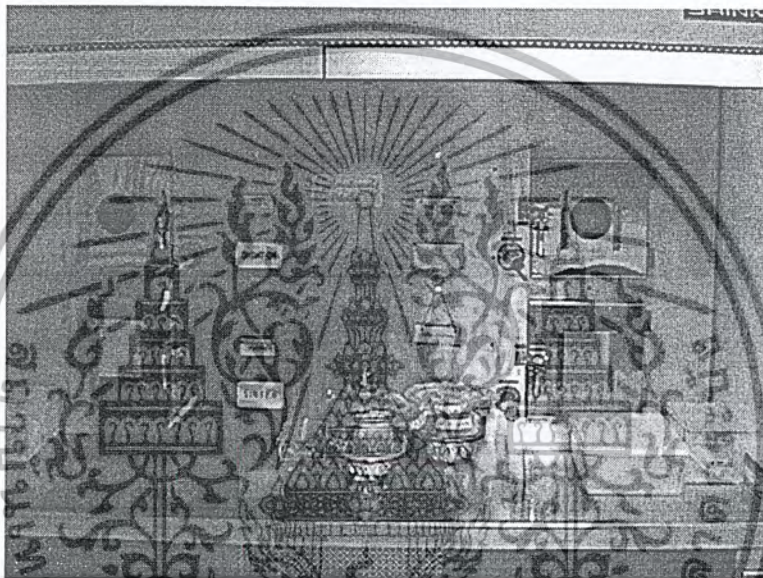
โดยปกติทั่วไปแล้วที่อุณหภูมิห้อง จะเกิดออกไซด์ (Oxide) ที่บนผนังซิลิกอนได้อยู่แล้ว แต่เราสามารถควบคุมความหนาของชั้นออกไซด์ บนผิวซิลิกอนได้ โดยการให้ความร้อนแก่น้ำด้วย อุณหภูมิสูงประมาณ 900 ถึง 1200 C ภายในเตาจะเต็มไปด้วย ออกซิเจนบริสุทธิ์ หรือ ไออน้ำ โดยทั้งไอ น้ำและออกซิเจน จะติดอยู่ที่แผ่นซิลิกอนเกิดการรวมตัวกับซิลิกอนเป็น ซิลิกอนไดออกไซด์ เขียนเป็น สูตรปฏิกิริยาทางเคมีได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของออกไซด์ และระยะที่ใช้ในการออกซิเดชันแบบแห้ง

ขั้นตอนการทำออกซิเดชัน (Oxidation process)

เตรียมแผ่นซิลิกอน โดยทำความสะอาดแผ่นให้สะอาดเสียก่อน จากนั้นวางลงบน โป๊ต (Boat) แล้วใส่เข้าไปในท่อควอตซ์ โดยใช้ท่อกลมเร็วที่ทำด้วยควอตซ์ใช้ในการดัน โป๊ตอย่างช้าๆเพื่อไม่ให้แผ่นซิลิกอนแตกเพราะจะเจอกับอุณหภูมิที่สูงเกินไป จากนั้นค่อยๆดัน โป๊ตจนถึงตรงกลางของเตา ใน การทำออกซิเดชันความหนาของชั้นออกไซด์ จะขึ้นอยู่กับเวลาและแบบในการทำออกซิเดชันด้วย



รูปที่ 3.3 แสดงเตาที่ใช้ในกระบวนการออกซิเดชัน

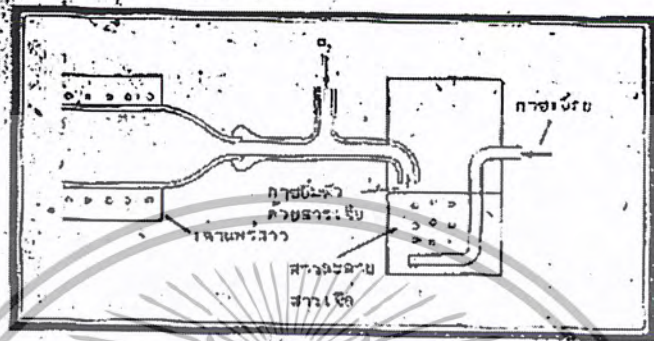
3.2 กระบวนการได้ปสารเจือด้วยกระบวนการแพร่ (Diffusion)

การแพร่สารเจือเป็นกระบวนการสร้างรอยต่อพี-เอ็น อีกแบบหนึ่ง โดยใช้สารเจือที่มีสภาพเป็น ไอ แก๊สแพร่เข้าไปแทรกในแผ่นซิลิกอนเกิดเป็นสารกึ่งตัวนำตามชนิดของสารเจือที่นำมาแพร่ใส่ซิลิกอนนั้นๆ ในกระบวนการแพร่มีอยู่ 2 ขั้นตอนดังนี้

1. **ปรีดีโพสิชัน (Pre-deposition)** เป็นกระบวนการ แพร่สารเจือขั้นต้น ซึ่งจะแพร่เข้าไปในซิลิกอนเพียงชั้นๆ เท่านั้น(ที่ผิวของซิลิกอน) แต่จะเป็นตัวกำหนดและควบคุมปริมาณสารเจือที่เข้าไปในแผ่นซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.การขับเคลื่อน (Drive-in) เป็นกระบวนการการแพร่ขึ้นต่อมาจากการปรีดีโพซิชั่น เพื่อให้สารเจือแพร่เข้าไปในซิลิกอนให้ลึกกว่าเดิมและควบคุมลักษณะการกระจายของสารเจือที่แพร่เข้าไปในผลึกซิลิกอน



รูปที่ 3.4 แสดงการแพร่โดยใช้แผ่นซิลิกอนเข้าไปในเตาแพร่สารเจือ

โดยสารเจือที่นำมาแพร่ลงบนแผ่นซิลิกอนเรียกว่า แผ่นซอส (Source) ซึ่งปริมาณความหนาแน่นของสารเจือที่ได้นำเข้าไปจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิความร้อนและช่วงระยะเวลาที่ทำการแพร่ในกระบวนการ ปรีดีโพซิชั่น ใช้ที่อุณหภูมิ 1000°C เวลา 10 นาที และการขับเคลื่อนที่ 1200°C ในเวลา 3 นาที

3.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithographic process)

เป็นวิธีการนำมาร์ค (Mask) ที่ตัดเป็นลวดลายที่ต้องการแล้วทำให้ลวดลายนั้นลงไปอยู่บนแผ่นซิลิกอน โดยจะเป็นวิธีการที่ทำเป็นแบบพิมพ์ด้วยการถ่ายรูปที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง การที่ลวดลายของมาร์ค จะปรากฏบนแผ่นซิลิกอนจะต้องใช้น้ำยาไวแสง (Photoresist) เคลือบผิวแผ่นซิลิกอนเสียก่อน จากนั้นถ่ายมาร์คด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) ที่มีความเข้มสูง จึงนำแผ่นที่ถ่ายด้วยมาร์คเสร็จแล้ว ไปสกัดน้ำยาไวแสงด้วยสารเคมี ซึ่งถ้าหากเป็นน้ำยาไวแสงชนิดลบ (Negative Photoresist) ที่ใดที่โดนน้ำยาไวแสงจะไม่ถูกสกัดออกแต่ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive Photoresist) ส่วนใดโดนแสงน้ำยาไวแสงจะละลายถูกสกัดออกได้ง่าย จากนั้นสกัดชั้นออกไซด์สุดท้ายก็เป็นการลอกฟิล์มที่เคลือบอยู่

3.4 ฟิล์มดีโพสิชัน (Film Deposition)

ในกระบวนการสร้างจะประกอบด้วยหลายๆ ขั้นตอนในแต่ละฟิล์มบางๆ นั้นจะมีส่วนประกอบที่หลากหลายที่วางบนแผ่นซิลิกอน ซึ่งวิธีการนี้จะกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการอีวาโปเลชัน (Evaporation)

3.5 การทำอีวาโปเลชัน (Evaporation process)

ในการเคลือบสารในสุญญากาศในงานอุตสาหกรรมการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแบ่งออกเป็น 5 วิธีคือ

1. Filament evaporation
2. Electron – beam evaporation (E – beam)
3. Flash evaporation
4. Induction evaporation
5. Sputtering

โดยในที่นี้จะขอกล่าวคร่าวๆ เพราะว่า Lab ที่ใช้ในการทดลอง จะใช้แค่วิธี Filament evaporation เท่านั้น เทคนิค Electron beam โดยการใช้อิเล็กตรอนซึ่งมีความเข้มสูง โดยใช้อิเล็กตรอนจะทำให้สารนั้นหลอมเหลว โดยสารดังกล่าวจะถูกใส่ไว้ในเบ้าหลอม ซึ่งมีการระบายความร้อน สารจะระเหยเป็นไอพุ่งกระจายทั่วไปและเคลือบลงบนแผ่นผลึก

ส่วนวิธี Flash evaporation จะมีลักษณะคล้ายกับเทคนิค Filament evaporation กล่าวคือ สารจะถูกระเหยเป็นไอด้วยความร้อนจากตัวความต้านทาน เส้นลวดของสารจะถูกทำให้ผ่านไปบนแท่งเซรามิกที่ร้อนจัด

เทคนิควิธี Induction evaporation เป็นเทคนิคที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุความถี่สูง เป็นสิ่งหนึ่งช่วยนำความร้อนให้แก่สาร คล้ายกับในกระบวนการอิพิแทกเซียล

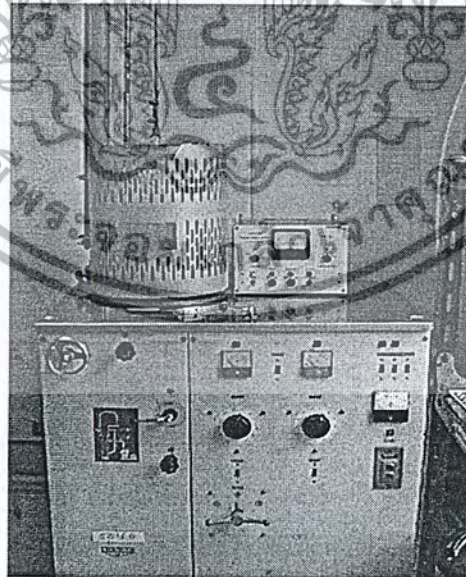
เทคนิค Sputtering เป็นวิธีการเคลือบโลหะในสุญญากาศอีกวิธีหนึ่งภายใน chamber จะมีก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอน และความดันภายในมีค่าต่ำที่ขั้วของคาโทด จะมีสารที่ต้องการเคลือบอยู่ และแผ่นผลึกจะวางอยู่ที่ขั้วแอโนดระหว่างขั้วไฟฟ้าต่างๆ สนามไฟฟ้าภายในนี้จะทำให้อะตอมของอาร์กอนมีสภาพเป็นอไอออน และถูกเร่งอไอออนนี้จะกระทบกับคาโทด ทำให้อะตอมของสารหลุดออกมาและไปเคลือบบนแผ่นผลึกซึ่งวางอยู่ที่ขั้วแอโนด อัตราการเคลือบนี้จะช้ากว่าเทคนิคอื่นๆ แต่เหมาะสมสำหรับการใช้ในการเคลือบโลหะที่หลอมละลายยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนเทคนิค Filament evaporation เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดสิ้นเปลืองน้อยที่สุด การเคลือบสารทำได้ โดยทำให้สารนั้นได้รับความร้อนจาก “ ไส้ ” (filament) หรือ “ โป๊ต ” (boat) ที่สารนั้นวางอยู่ไส้หรือ โป๊ตได้รับความร้อนจากการที่มีกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน ขณะทำการเคลือบสารจะต้องควบคุมให้กระแสที่ไหลผ่านไส้เพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ กระทั่งสารที่วางอยู่ที่ไส้ ได้รับความร้อนจนละลายติดอยู่กับไส้ก็จะระเหยเป็นไอออกมาฟุ้งกระจายเคลือบแผ่นผลึกที่วางไว้ใน Chamber เทคนิคนี้ บางครั้งก็ใช้ สำหรับการเคลือบทองลงบนหลังของแผ่นผลึก

ในการเคลือบโลหะเป็นฟิล์มจะมีอยู่ 5 วิธีดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งขั้นตอนการเคลือบโลหะจะมี ขั้นตอนคร่าวๆดังต่อไปนี้

1. นำแผ่นซิลิกอนที่ทำความสะอาดแล้วใส่เข้าไปในกรอบแก้วสุญญากาศที่ดูดอากาศได้ค่าความดันที่ต้องการแล้ว
2. นำอลูมิเนียมวางลงบนเส้นลวดความร้อนซึ่งอาจเป็นลวดทังสเตน เรียกว่า โป๊ต (boat) แล้วปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจนอลูมิเนียมระเหยกลายเป็นไอกระจายไปทั่วจนเคลือบที่แผ่นซิลิกอน
3. เมื่อเคลือบ ได้ความหนาตามต้องการแล้วซึ่งคิดตามเวลาและความดันภายในแคลมเบอร์ (Chamber) โดยสามารถควบคุมได้โดยการเติมก๊าซใน โครเจนเหลวเพื่อควบคุมสภาวะความร้อน



รูปที่ 3.5 แสดงหลอดสุญญากาศที่ใช้ในกระบวนการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (Evaporation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ขบวนการแอนลอยและแอนนีส (Alloy and Anneal)

หลังจากทำการเคลือบอะลูมิเนียมและการทำการ โฟโตลิโทกราฟีแล้วอะลูมิเนียมจะทำหน้าที่เป็น แถบโลหะตัวนำ และก่อให้เกิดรอยสัมผัสโอห์มิกขึ้น อย่างไรก็ตามรอยสัมผัสนี้ยังไม่อาจรับรองได้ว่าเป็น รอยสัมผัสที่สมบูรณ์ ขบวนการแอนลอยจะช่วยทำให้มั่นใจได้ว่าเป็นรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและ ซิลิกอนซึ่งเป็นรอยสัมผัสโอห์-มิกที่สมบูรณ์ มีความต้านทานต่ำ การแอนลอยจะกระทำภายในเตาแพร่ สารแต่ถูกปรับให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิและเวลาสำหรับสำหรับการแอนลอยเปลี่ยนแปลงได้ แต่ขีด จำกัดของอุณหภูมิ สามารถหาได้จากกราฟ ซึ่งเป็นการแอนลอยระหว่าง อะลูมิเนียมและซิลิกอน เส้น ซึ่งมีลูกศรชี้อยู่ แสดง ถึงค่าอุณหภูมิต่ำสุด ที่สามารถทำให้สาร ทั้งสอง ละลายรวมกัน ได้อย่างสมบูรณ์ และอุณหภูมินี้จะเปลี่ยนแปลงไปถ้าหากสัดส่วนของอะตอมของ ซิลิกอนเปลี่ยนแปลง ดังในรูป อุณหภูมิต่ำสุดของสารทั้งสองที่สามารถหลอมเหลวได้ก็คือ 577°C โดยทั่วไปมักทำการแอนลอยที่ อุณหภูมิระหว่าง 450°C ถึง 550°C โดยใช้เวลาราว 10 ถึง 30 นาที ในขณะที่ทำการแอนลอยมักมีการ ปลดปล่อยให้ก๊าซผสมซึ่งมีไฮโดรเจนรวมอยู่ไหลเข้าไปในท่อควอทซ์ด้วย การทำเช่นนี้ถูกเรียกว่า “การ แอน-นีส” (anneal) เป็นการกระทำเพื่อช่วยให้คุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติที่ดีที่สุด และมีการทำงานที่แน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงง่ายต่อสภาพแวดล้อม ทั้งนี้ก็โดยที่อะตอมของก๊าซ ไฮโดรเจน จะรวมตัวกับอะตอมของธาตุแปลกปลอมอื่นๆ ซึ่งเคลื่อนที่ อยู่ในบริเวณผิวสัมผัสระหว่างซิลิกอน และซิลิกอนไดออกไซด์

ดังนั้นผลของไฮโดรเจนจะช่วยลดผลของที่เกิดขึ้น เนื่องจากอะตอมของธาตุเหล่านี้ได้ อุณหภูมิของการแอนนีสมักจะอยู่ช่วง 400°C ถึง 500°C

3.7 การตัดแยกแผ่นผลึก

เมื่อทำการวัดอุปกรณ์เสร็จเรียบร้อยแล้วจากนั้นจะทำการตัดแบ่งแผ่นผลึก ซึ่งสิ่งประดิษฐ์แต่ละ ชิ้นแต่ชิ้นเรียกว่า “ไดซ์” (dices) ในการตัดแยกแผ่นผลึกออกเป็นแต่ละไดซ์อาจทำได้หลายวิธี ซึ่งโดย มากนิยมใช้วิธีดังต่อไปนี้ คือ

1. วิธี **Diamond scribing** เป็นวิธีการแยกไดซ์โดยใช้เข็มเพชรกรีดลงบนแผ่นผลึกตามแนวทางที่กำหนดไว้- แล้วจึงนำไปหักแยกตามรอยกรีด จะทำให้ได้ชิ้นของไดซ์แยกออกจากกัน

2. วิธี **Laser scribing** เป็นวิธีการแยกไดซ์โดยใช้เลเซอร์โดยให้ลำของเลเซอร์ตกกระทบแผ่นผลึกตามแนวที่กำหนดไว้แล้วจึงนำไปหักแยกตามรอยเลเซอร์ลำเลเซอร์จะทำให้แผ่นผลึก

3. วิธี **Sawing** เป็นวิธีการแยกไดซ์โดยใช้ใบเลื่อยตัด ใบเลื่อยจะมีลักษณะเป็นแผ่นวงกลม หมุนรอบตัวเอง และมีความคมเป็นพิเศษ ซึ่งเป็นวิธีที่ดีที่สุดและเสียหายน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการตัดแผ่นผลึกเสร็จเรียบร้อยแล้วจะนำโคช มาต่อสายลวดโลหะมาใช้งานซึ่งการต่อสายลวดโลหะนั้นจะแบ่งเป็น 2 วิธีคือ

- 1.วิธี **Thermal compression bonding** จะเป็นการใช้ความร้อนและแรงกดในการต่อสายโลหะ
- 2.วิธี **Ultrasonic bonding** จะเป็นการใช้พลังงานจากคลื่นเสียงความถี่สูงในการต่อลวดโลหะ

โดยในการตัดแผ่นผลึกออกเป็นแต่ละโคชนั้น จะใช้วิธี diamond scribing และการต่อลวด โลหะนั้นจะใช้วิธีของ thermal compression bonding ซึ่งจะได้ magnetrotransistor พร้อมขาต่อใช้งานเพื่อที่จะนำไปใช้งานต่อไป



บทที่ 4

การออกแบบและการสร้าง

อุปกรณ์ทุกตัวที่สร้างเป็นตัวเซนเซอร์ (Sensors) โดยทั่วไปแล้วจะต้องยึดหลักสำคัญคือ จะต้องมีความไวสูง (Sensitivity) มีขนาดเล็กสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในวงจรรวมได้

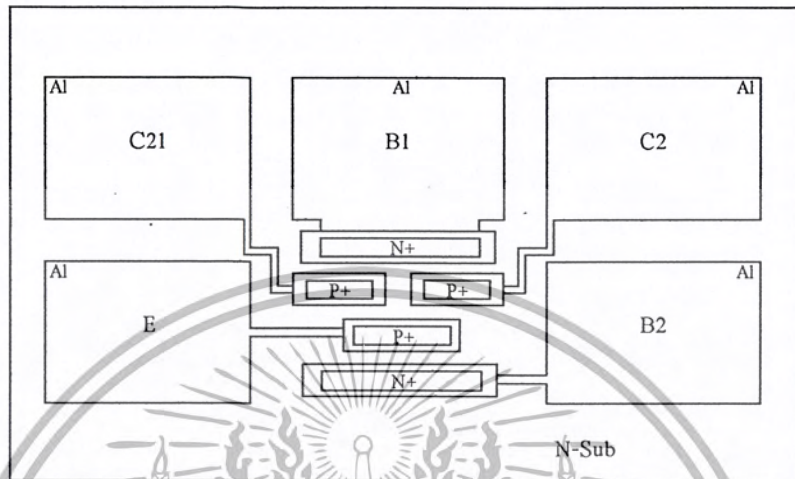
4.1 การออกแบบ

หลักสำคัญในการออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ก็เช่นเดียวกับตัวอุปกรณ์เซนเซอร์ชนิดอื่นๆ คือต้องความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่เร็ว และจะต้องมีขนาดเล็ก

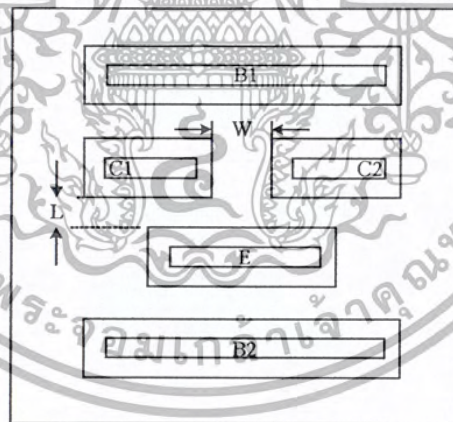
เพื่อให้ทราบว่า การออกแบบที่มีความไวสูงทำได้ดังนี้

- การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ คือการเปลี่ยนค่าความกว้าง (W) และความยาว (L) ในการออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์นอกจากออกแบบให้ทำงานได้แก่ระยะห่างระหว่าง C_1, C_2 และคอลเลกเตอร์ทั้งสอง กับ อิมิตเตอร์ ซึ่งต่อไปนี้จะนิยามให้เป็น L และระยะห่างระหว่าง C_1 กับ C_2 นิยามว่าเป็นระยะห่าง W มีรายละเอียดดังนี้

1. เพื่อศึกษาผลกระทบกับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเมื่อระยะ W ของชั้นสาร $20\mu\text{m}$ และให้ระยะ L ของชั้นสารยาว $20\mu\text{m}$ เป็นพารามิเตอร์ตัวแรกที่ได้ออกแบบไว้
2. เพื่อศึกษาผลกระทบกับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเมื่อระยะ W ของชั้นสาร $10\mu\text{m}$ และให้ระยะ L ของชั้นสารยาว $20\mu\text{m}$ เป็นพารามิเตอร์ตัวที่สอง
3. เพื่อศึกษาผลกระทบกับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเมื่อระยะ W ของชั้นสาร $20\mu\text{m}$ และให้ระยะ L ของชั้นสารยาว $10\mu\text{m}$ เป็นพารามิเตอร์ตัวที่สาม
4. เพื่อศึกษาผลกระทบกับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเมื่อระยะ W ของชั้นสาร $10\mu\text{m}$ และให้ระยะ L ของชั้นสารยาว $10\mu\text{m}$ เป็นพารามิเตอร์ตัวสุดท้าย



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์
 (ก) แสดงภาพด้านบนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์
 (ข) แสดงพารามิเตอร์ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

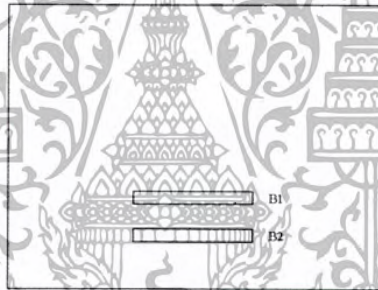
4.2 การออกแบบมาร์ค

นำรูปร่าง และพารามิเตอร์ต่างๆ ไปสร้างมาร์ค ซึ่งมาร์คทั้งหมดจะมีด้วยกันอยู่ 4 มาร์ค ได้แก่

1. Mask Base
2. Mask Emitter & Collector
3. Mask window เปิดช่อง Contact
4. Mask Aluminum

4.2.1 มาร์คเบส

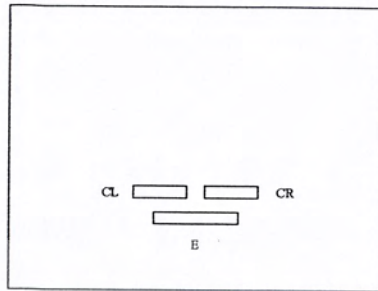
เป็นมาร์คชั้นสารชนิด N+ สองชั้นวางอยู่ตำแหน่งบนสุดและล่างสุด ทั้งสองชั้นมีความยาวและความกว้างเท่ากัน



รูปที่ 4.2 มาร์คที่ 1 มาร์คเบส

4.2.2 มาร์คคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์

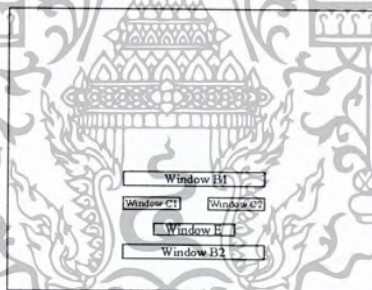
เป็นมาร์คชนิด P+ สามชั้น คอลเลคเตอร์สองชั้น และอิมิตเตอร์หนึ่งชั้นทั้งสามชั้นวางอยู่ระหว่างเบสทั้งสอง โดยที่มาร์คของคอลเลคเตอร์ทั้งสองชั้นมีขนาดเท่ากันวางคาบเกี่ยวกับอิมิตเตอร์ในแนวนอนเท่าๆ กัน



รูปที่ 4.3 มาร์คที่ 2 มาร์คคอลลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์

4.2.3 มาร์ควินโดว์ เปิดมาร์ค

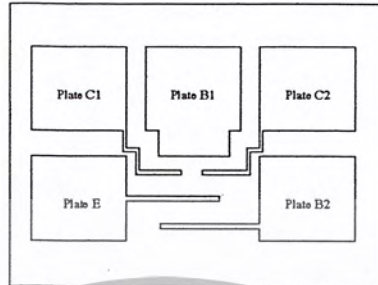
เป็นชั้นสารทุกชั้นสัมพันธ์กับอะลูมิเนียมเพื่อต่อวัดทดสอบตำแหน่งของมาร์คจะอยู่ในชั้นสารทุกชั้นสาร



รูปที่ 4.4 มาร์ควินโดว์

4.2.4 มาร์คอะลูมิเนียม

เป็นมาร์คสำหรับต่อวัดทดสอบเพื่อให้เกิดความสะดวกจึงออกแบบให้มีขนาดใหญ่ที่สุดบนพื้นที่ที่เหลือ



รูปที่ 4.5 มาร์คอะลูมิเนียม

4.3 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์

การสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์จะใช้แผ่นซิลิกอนที่มีระนาบ (100) เป็นแผ่นชนิดเอ็น โดยมีพิสัยความต้านทานประมาณ 1-5 $\Omega\text{-cm}$ และความหนาของแผ่นประมาณ 400 μm ขั้นตอนกระบวนการสร้างสามารถสรุปได้ดังนี้ โดยแสดงดังรูปที่ 3.6

1. หลังจากทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน จึงนำแผ่นไป Oxidation ประมาณ 6 ชั่วโมง จะได้ความหนาของแผ่นออกไซด์ประมาณ 5000 \AA
2. นำแผ่นไปทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาร์คที่ 1 จากนั้นทำการสกัดออกไซด์ออก
3. แพร่สารเจือฟอสฟอรัส เพื่อสร้างชั้นสารเบส
4. ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาร์คที่ 2
5. โต้ปอะตอมสารเจือ โบรอนที่มีความเข้มข้นสูง เพื่อสร้างชั้นสารคอลเลคเตอร์ และอิมิตเตอร์
6. ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาร์คที่ 3 เป็นการเปิดหน้าสัมผัสของอุปกรณ์
7. เคลือบอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่องอีวาโปเรเตอร์
8. ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาร์คที่ 4 เพื่อสกัดอลูมิเนียมออก
9. ทำกระบวนการ Sintering เพื่อให้เป็นโอห์มมิกคอนแทค



รูปที่ 4.6 แสดงกระบวนการสร้างเมกนีโตทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 วงจรการประยุกต์ใช้งาน

ในส่วนของวงจรการประยุกต์ใช้งาน จากการทดลองเพื่อที่จะนำอุปกรณ์เซนเซอร์นั้นออกมาใช้งานได้จริง คณะผู้จัดทำจึงได้ทำการออกแบบวงจรตรวจจับสนามแม่เหล็กขึ้น ซึ่งวงจรตรวจจับสนามแม่เหล็กประกอบด้วยภาคการทำงานต่างดังนี้ ส่วนประกอบของวงจรมีจะประกอบไปด้วย 4 ภาค ดังในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 Block Diagram ของวงจร

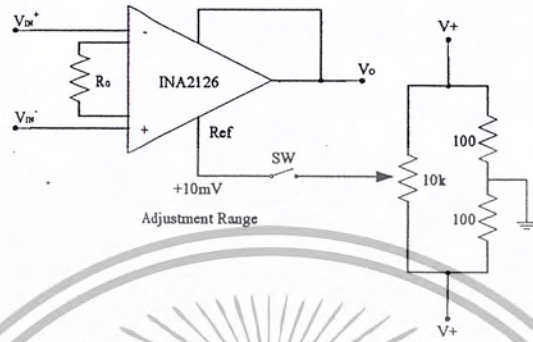
การสร้างวงจรในการประยุกต์ใช้งาน จะประกอบด้วยภาคการทำงานอยู่ 4 ภาคซึ่งจะประกอบไปด้วย

4.4.1 ภาคขยาย (Amplifier)

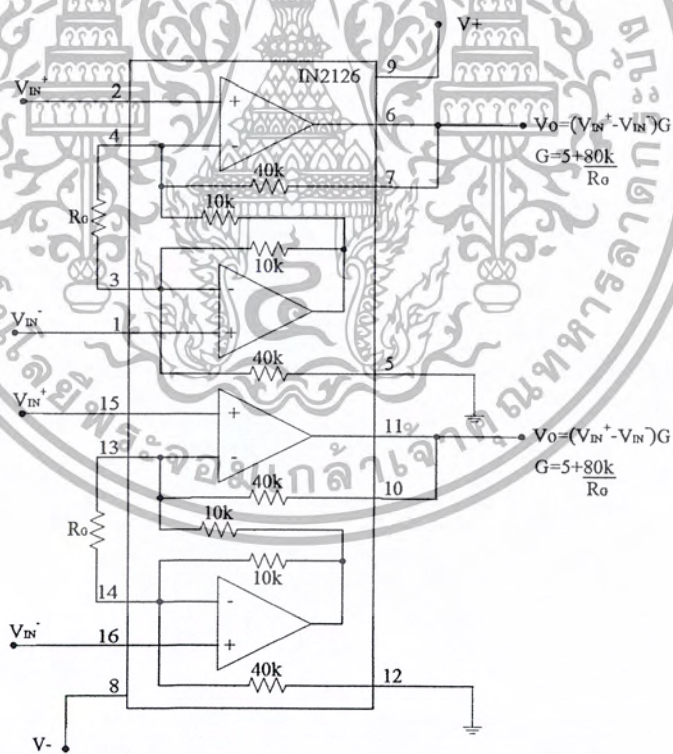
ในส่วนของวงจรการประยุกต์ใช้งานนี้ได้ใช้ภาคขยายเป็น Amplifier เบอร์ INA2126 เพราะตัวขยายตัวนี้มีคุณสมบัติที่ดีและมีอัตราขยายที่สูง คือมีอัตราขยายประมาณ 1000 เท่า คุณสมบัติของ INA2126 มีดังนี้

ลักษณะเฉพาะของ INA2126

- Low quiescent current : 175 μ A/chan.
- Wide supply range : ± 1.35 V to ± 1.8 V
- Low offset voltage : 250 μ V max
- Low offset drift : 3 μ V/ $^{\circ}$ C max
- Low noise : 35nV/ \sqrt{Hz}
- Low input bias current : 25nA max
- 8 pin DIP , SO-8, MSOP-8 surface – MOUNT DUAL : 16-pin DIP , SO-16 , SSOP-16



รูปที่ 4.8 วงจร Offset Trimming ที่ใช้กับ INA 2126



รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างภายในของ Amplifier เบอร์ INA2126

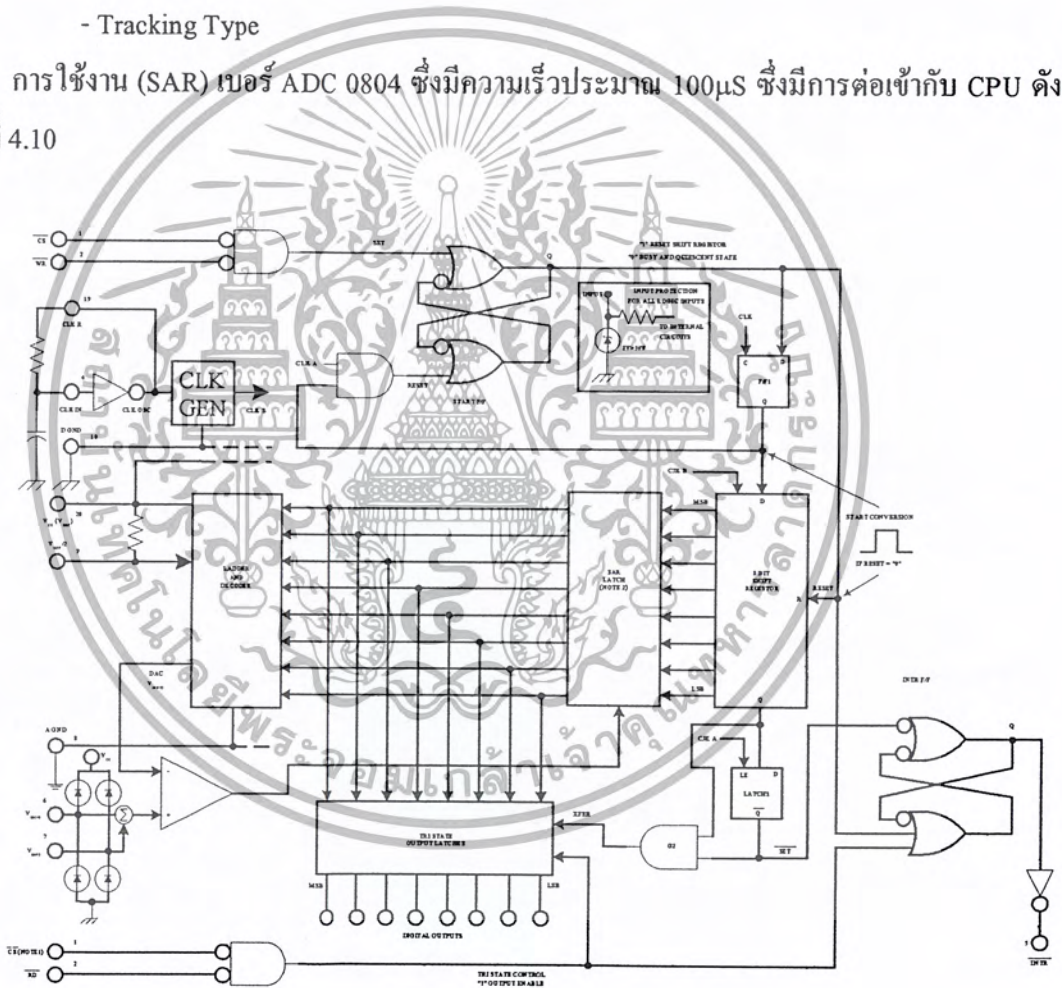
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 โครงสร้างของ A/D

A/D มีหลายชนิดด้วยกันเช่น

- Dual Slope Type
- Successive Approximation Register Type (SAR)
- Flash Type
- Tracking Type

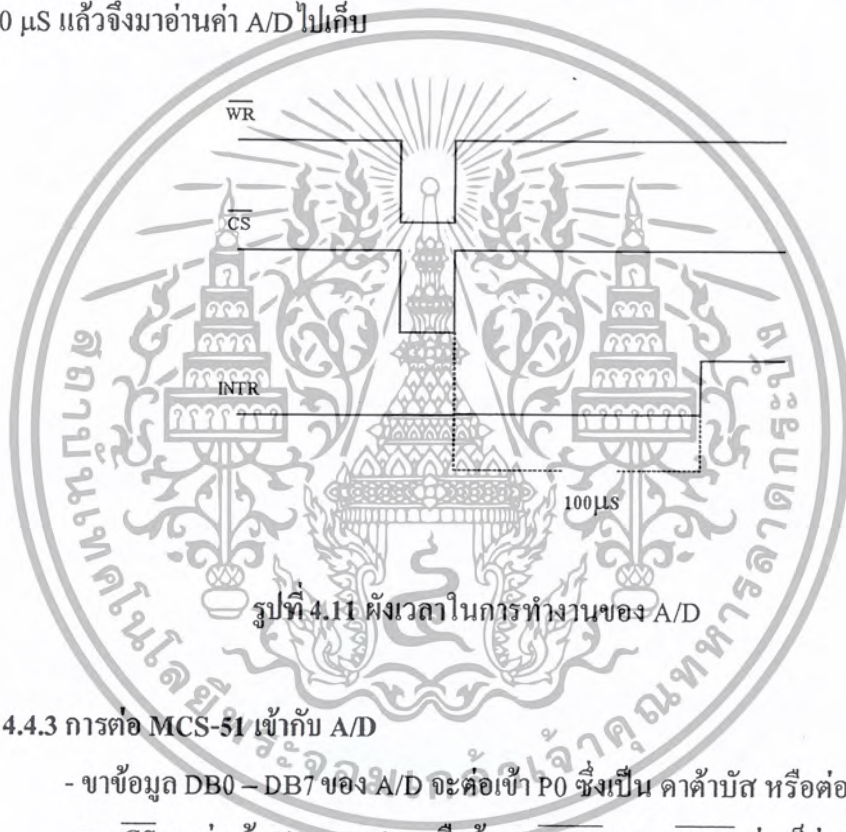
การใช้งาน (SAR) เบอร์ ADC 0804 ซึ่งมีความเร็วประมาณ $100\mu\text{s}$ ซึ่งมีการต่อเข้ากับ CPU ดังในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 โครงสร้างของ ADC 0804 และการจัดวางขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

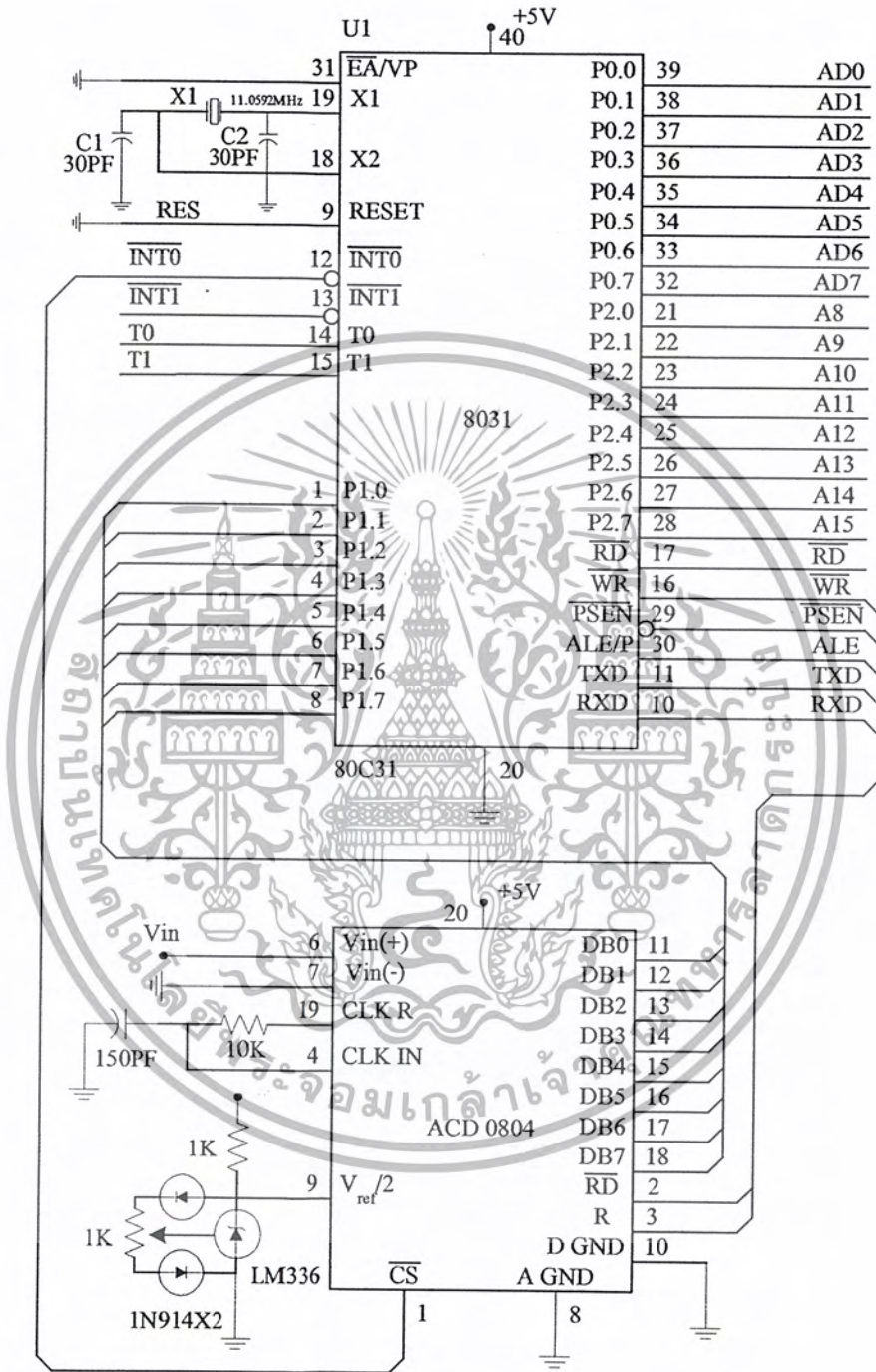
การแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัลนั้น จำเป็นที่จะต้องเริ่ม Start A/D ก่อน โดยทำให้ขา \overline{WR} เป็น Low ความเร็วในการแปลงสัญญาณเท่าไรขึ้นอยู่กับชนิดของ A/D นั้นๆ เช่นเบอร์ ADC0804 จะมีค่า Conversion Time ประมาณ 100 μs เมื่อแปลงสัญญาณเสร็จแล้วก็มีสัญญาณออกมาที่ขา INTR เป็น High สัญญาณนี้ A/D บางเบอร์ จะเขียนว่า EOC ดังนั้นในการเขียน โปรแกรมต้องทำการเขียนพอร์ต A/D ก่อน หลังจากนั้นก็รอขา INTR เป็น High แล้วจึงอ่านข้อมูลไปเก็บเป็นการสิ้นสุดการทำงาน 1 รอบหรืออีกวิธีหนึ่งคือ เมื่อทำการ Start A/D แล้วให้ทำการวนลูปรอจนกว่าจะกินเวลาครบ 100 μs แล้วจึงมาอ่านค่า A/D ไปเก็บ



รูปที่ 4.11 พังเวลาในการทำงานของ A/D

4.4.3 การต่อ MCS-51 เข้ากับ A/D

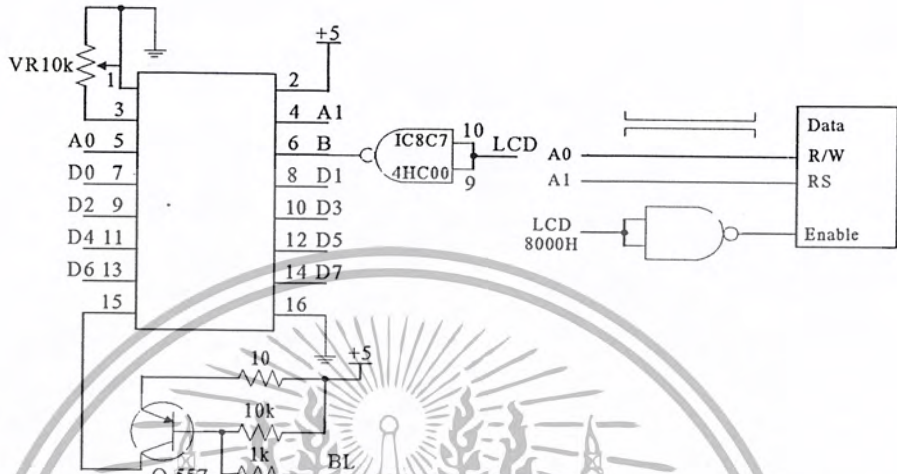
- ขาข้อมูล DB0 – DB7 ของ A/D จะต่อเข้า P0 ซึ่งเป็น คาต้าบัส หรือต่อเข้ากับ P1
- ขา \overline{CS} จะต่อเข้า I/O Decoder หรือถ้าขา $\overline{INT0}$ และ $\overline{INT1}$ วางก็ต่อเข้าได้เลย
- การทำให้ขา \overline{WR} เป็น Low ทำให้โดยใช้คำสั่ง MOVX @DPTR,A (Write DATA)
- การทำให้ขา \overline{RD} เป็น Low ทำให้โดยใช้คำสั่ง MOVX A, @DPTR (Read DATA)
- การทำให้ขา $\overline{INT0}$ เป็น Low ทำให้โดยใช้คำสั่ง CLR P3.2
- การทำให้ขา $\overline{INT1}$ เป็น Low ทำให้โดยใช้คำสั่ง CLR P3.3



รูปที่ 4.12 การต่อ A/D เข้ากับ MCS-51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์แสดงผลแบบ LCD



รูปที่ 4.13 การเชื่อมต่อกับ LCD มอดูล

อุปกรณ์แสดงผลแบบ LCD นี้บางครั้งเรียกว่า LCD module เนื่องจากภายในประกอบไปด้วย อุปกรณ์ต่างๆ หลายส่วน เช่น รีจิสเตอร์คำสั่ง (Instruction Register : IR) ทำหน้าที่รับคำสั่งควบคุมการแสดงผล หน่วยความจำแสดงผล (Display Data RAM : DDRAM) หน่วยความจำรวมตัวอักษร (Character Generator ROM : GROM) เป็นหน่วยความจำที่เก็บสัญลักษณ์และอักขระต่างๆ ที่แสดงผล เป็นต้น LCD ที่ใช้ในโครงการจะเป็นแบบแสดงผล 16 ตัวอักษร แบบบรรทัดเดียว ซึ่งมีลักษณะรูปร่างและขาต่างๆ ดังรูปที่ 4.14



16

1

รูปที่ 4.14 ภาพ LCD module

ขา V_{CC} (ขา 2) และ V_{SS} (ขา 1) จะใช้ต่อกับไฟเลี้ยง +5 V และ ground ส่วน V_{EE} (ขา 3) จะใช้เป็นขาปรับแรงดันไฟเพื่อควบคุมความสว่างของการแสดงผล (ควรวางในการต่อขา V_{CC} และ V_{SS} เนื่องจาก LCD มีความขบอบบางมาก)

ขา Register Select : RS (ขา 4) เนื่องจากภายใน LCD module จะมีรีจิสเตอร์ที่สำคัญภายใน 2 ตัว คือ รีจิสเตอร์เก็บคำสั่ง และ ข้อมูล ขา RS นี้จึงเป็นตัวเลือกว่าข้อมูลที่ส่งเข้าไปจะเป็นคำสั่งหรือข้อมูล โดย

RS=0 หมายความว่าข้อมูลที่เข้ามาเป็นคำสั่ง

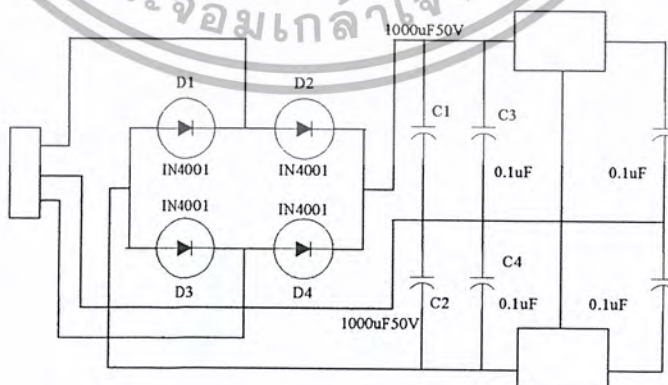
RS=1 หมายความว่าข้อมูลที่เข้ามาเป็นข้อมูลที่将会แสดงผลบนจอ LCD

ขา Read/Write : R/W (ขา 5) เป็นขาอินพุท ถ้าขานี้เป็น 1 จะเป็นการอ่านข้อมูลจาก LCD ถ้าขานี้เป็น 0 จะเป็นการเขียนข้อมูลลงเป็นขาที่จะทำให้ LCD ทำงานโดยป้อนสัญญาณพัลซ์เข้าไปหนึ่งลูก โดยพัลซ์นี้จะต้องมีความกว้าง 450 nS เป็นอย่างน้อย

ขา Data : D_0-D_7 (ขา 7 - 14) เป็นขาที่รับส่งข้อมูลระหว่าง LCD module กับอุปกรณ์ภายนอก ในการทำให้ LCD module ทำการแสดงผล เริ่มต้นจะต้องเขียนคำสั่งควบคุม LCD ลงไปก่อนซึ่งจะเป็นการกำหนดให้แสดงผลในลักษณะต่างๆ จากนั้นก็จะส่งรหัส ASCII ของตัวอักขระต่างๆที่จะแสดงผลออกไปให้กับ LCD

4.4.5 วงจร Power Supply

สำหรับยกจ่ายไฟในโครงการได้ออกแบบให้ใช้แรงดัน (+5V) - (0) - (-5V) เพียงชุดเดียว เนื่องจากป้องกันไม่ให้ภาค Amplifier ขยายสัญญาณออกไปมากเกินไปจนทำให้ภาค ADCs เสียหายแล้วยังสามารถจ่ายไฟไปยังวงจรอื่นได้อีกด้วย



รูปที่ 4.15 วงจร Power Supply

4.4.6 การประมวลผลสัญญาณ

การประมวลผลสัญญาณจากวงจร Analog to Digital เราได้อินพุทเป็นบิตดิจิตอลเข้ามาทาง port 1 เราต้องนำอินพุทมาคำนวณกลับไปให้ เป็น Voltage ก่อนเพื่อที่จะนำ Voltage นั้นมาคำนวณเป็นหน่วยของสนามแม่เหล็กได้ดังสมการที่ 4.1 และ สมการที่ 4.2 ตามลำดับ

$$Vin = V_{ref} * \frac{(P_o)}{n} \quad 4.1$$

V_{in} = Input Analog Voltage

V_{ref} = Voltage Reference

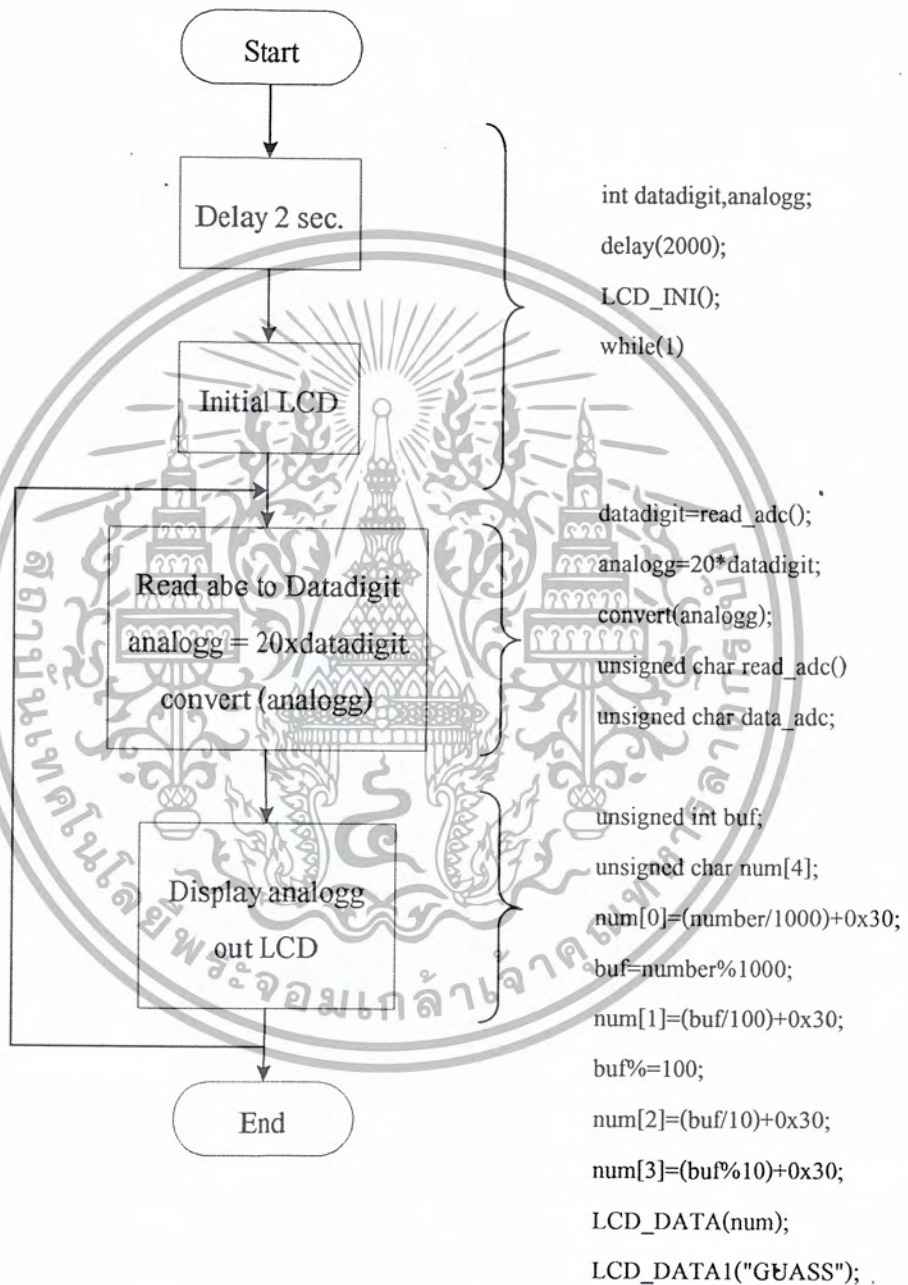
P_o = Output Port Digital

N = Number of level

$$Guass = f(V_{in}) \quad 4.2$$

จากสมการที่ 4.2 เราสามารถหาค่า Voltage ที่มีความสัมพันธ์กับค่า Guass จากการทดลองซึ่งเราต้องเลือกช่วงที่เซนเซอร์มีคุณสมบัติในการทำงานที่เป็นเชิงเส้น เราจะต้องเขียนสมการเส้นตรงนี้ขึ้นเพื่อจะคำนวณค่าของความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งสมการความสัมพันธ์นี้จะแตกต่างกันไปในเซนเซอร์แต่ละตัว เมื่อเรารู้ค่าความสัมพันธ์ต่างๆแล้วเราก็เขียนโปรแกรมเพื่อคำนวณหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กซึ่งโครงการนี้เราใช้ภาษา C เขียนในโปรแกรม Proviews เพื่อแปลง C File เป็น Hex File เพื่อใช้ในการ Burn ลงใน MCS51

4.4.7 โปรแกรมและFlowchartที่ใช้ในการควบคุม MCS51



รูปที่ 4.16 แสดง Flowchart ของ โปรแกรมที่ใช้ควบคุม MCS-51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การวัดและการทดลอง

เซนเซอร์ต่างๆ ไปจะต้องคำนึงถึงสัญญาณรบกวน เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตมีค่าน้อย ทำให้เกิดการรบกวนจากสัญญาณต่างๆ ได้ง่าย ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการป้องกัน ทั้งที่เกิดจากตัวอุปกรณ์เอง และอาจเกิดจากเครื่องมือวัด เพื่อให้เกิดความถูกต้องมากที่สุด

การทดลองในโครงการนี้ได้ทำการทดลองไว้ดังนี้

5.1 การวัดคุณสมบัติรอยต่อ P-N แมกนีโตทรานซิสเตอร์

การวัดคุณสมบัติรอยต่อ P-N แมกนีโตทรานซิสเตอร์ จะแสดงไว้ในรูปที่ 5.2 ในขั้นตอนนี้ใช้เครื่อง Transistor – Curve Tracer เป็นเครื่องมือวัดทดสอบ โดยมีวิธีการวัดดังรูปที่ 5.1

5.2 การตรวจวัดคุณสมบัติรอยต่อไบโพลาร์

การวัดคุณสมบัติรอยต่อไบโพลาร์ จะแสดงไว้ในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 โดยการตรวจวัดคุณสมบัติของรอยต่อไบโพลาร์จะทำการวัดอยู่ 2 ลักษณะคือ

5.2.1 คอมมอนอิมิตเตอร์

5.2.2 คอมมอนเบส

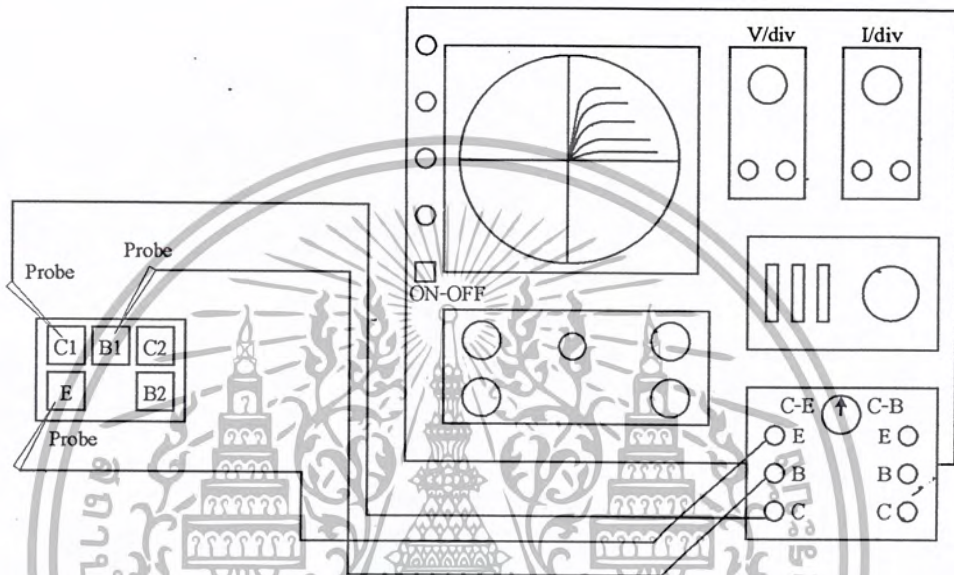
5.3 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

หลังจากการเตรียมพร้อม เครื่องมือสำหรับการวัด ดังแสดงในรูปที่ 5.5 นำอุปกรณ์ที่ต่อขาเรียบร้อยแล้วติดตั้งบนเครื่องผลิตสนามแม่เหล็ก ต่อจากนั้นทำการวัดและจดบันทึกค่าต่างๆ ตามที่ دستور การทดลองแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.6-5.11

5.4 การทดลองการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์กับวงจรประยุกต์ใช้งาน

เมื่อได้ผลของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแล้ว จากนั้นจะทำการทดลองผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์กับวงจรประยุกต์ใช้งาน โดยจะทำการเลือกค่าที่มีความเป็นลิเนียร์สูงที่สุดในการทดลองครั้งนี้ โดยจะเลือกค่า $I_E=100\mu A$ และ $V_{B2}=10V$ ต่อจากนั้นทำ

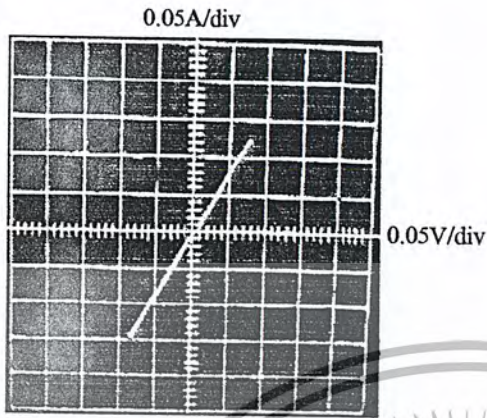
การวัดและจดบันทึกค่าต่างๆ ตามที่ต้องการจากการทดลองแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.12



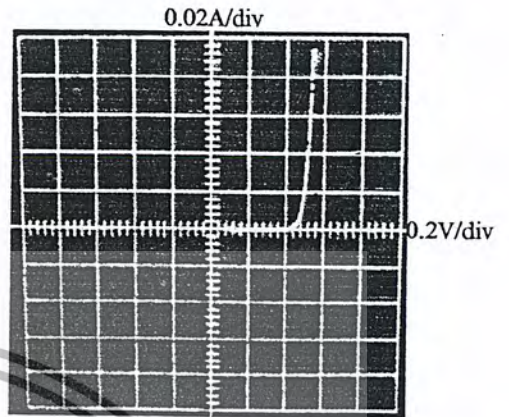
รูปที่ 5.1 แสดงการต่ออุปกรณ์ที่ใช้กับ Transistor – Curve Tracer ในการวัดคุณสมบัติรอยต่อ P-N และคุณสมบัติไบโพลาร์

5.1 ผลการวัดความเป็นรอยต่อ P-N

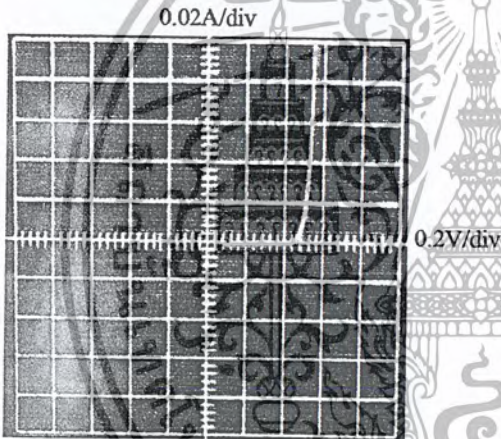
การวัดคุณสมบัติรอยต่อ P-N แมกนีโตทรานซิสเตอร์ เป็นการทดสอบเบื้องต้น เพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของรอยต่อ P-N ได้เป็นไปตามทฤษฎีอย่างถูกต้องหรือไม่ ซึ่งสามารถที่จะบ่งบอกให้รู้ได้ว่าแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่สร้างขึ้นดีหรือเสีย การตรวจสอบรอยต่อ P-N ได้ทำการวัดผลทั้งหมด 4 ซึ่งรูปกราฟจะมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยจะแสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งจะเป็นรูปกราฟความเป็นรอยต่อ P-N โดยรวม



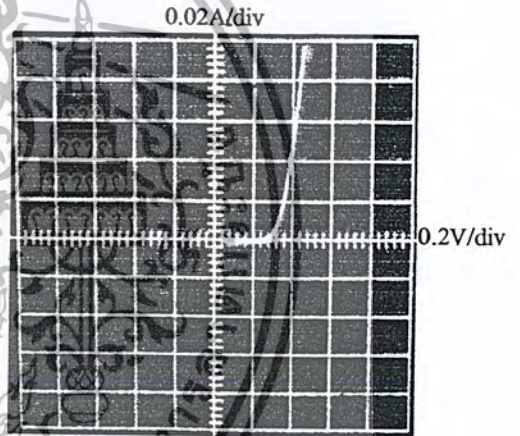
B1-B2



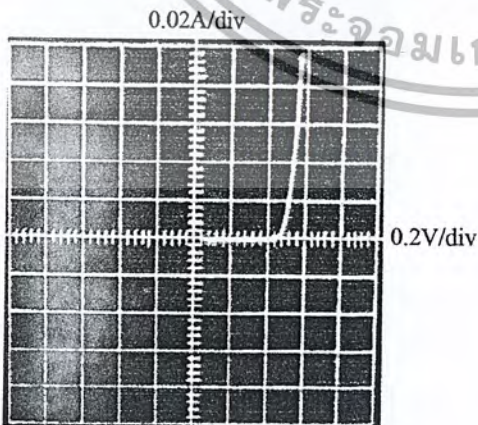
B1-C1



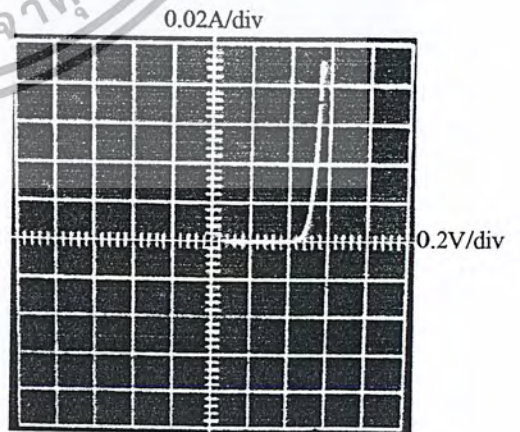
B1-C2



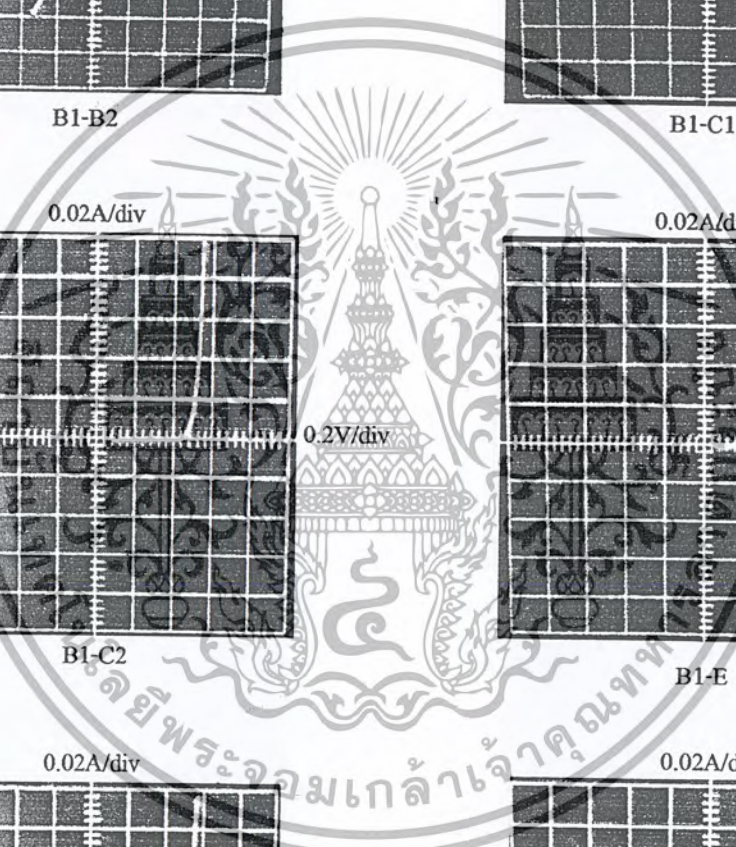
B1-E



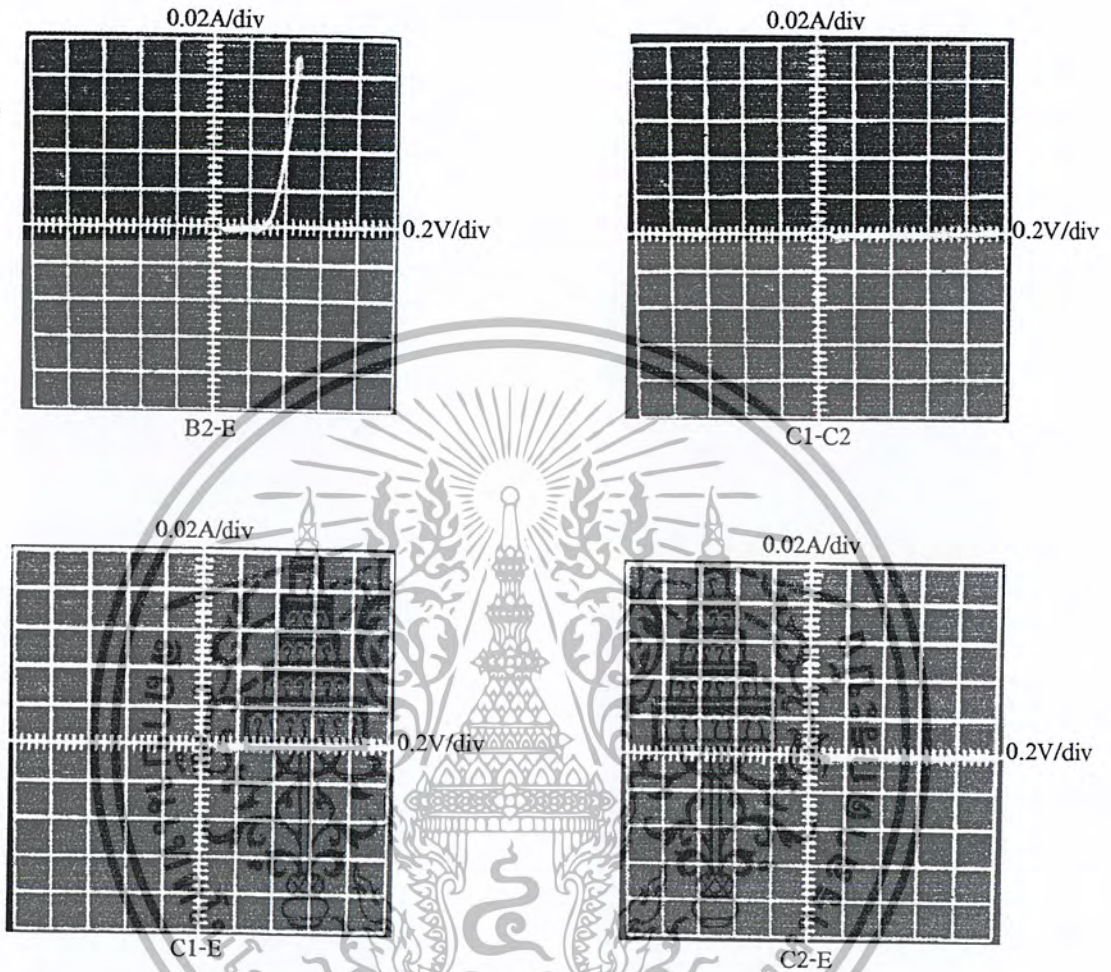
B2-C1



B2-C2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แสดงกราฟคุณสมบัติของรอยต่อ P-N

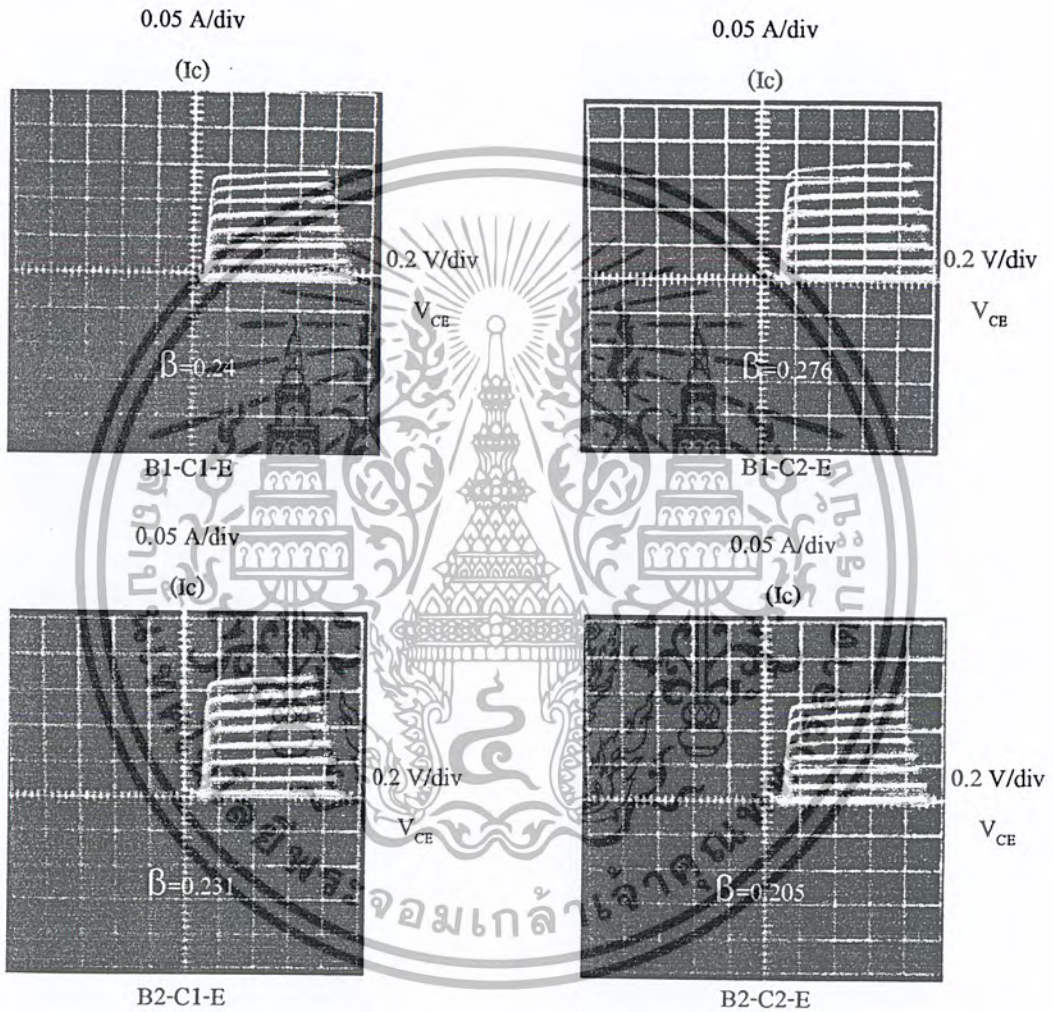
จากผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

รอยต่อ B1-B2 มีคุณสมบัติเป็นตัวต้านทาน ,รอยต่อ B1-C1 มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อ P-N ,รอยต่อ B1-C2 มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อ P-N ,รอยต่อ B1-E มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อ P-N ,รอยต่อ B2-C1 มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อ P-N ,รอยต่อ B2-C2 มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อ P-N ,รอยต่อ B1-C2 มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อ P-N ,รอยต่อ C1-C2 มีความต้านทานสูงมากเนื่องจากมีชั้นเอ็นชั้นกลาง ,รอยต่อ C1-E มีความต้านทานสูงมากเนื่องจากมีชั้นเอ็นชั้นกลาง และ รอยต่อ C1-C2 มีความต้านทานสูงมากเนื่องจากมีชั้นเอ็นชั้นกลาง

5.2 ผลการวัดความเป็นรอยต่อไบโพลาร์

เป็นการพิสูจน์ว่าทั้ง 5 ขั้วของ แมกนีโตทรานซิสเตอร์มีลักษณะเป็นรอยต่อแบบไบโพลาร์

5.2.1 คอมมอนอิมิตเตอร์

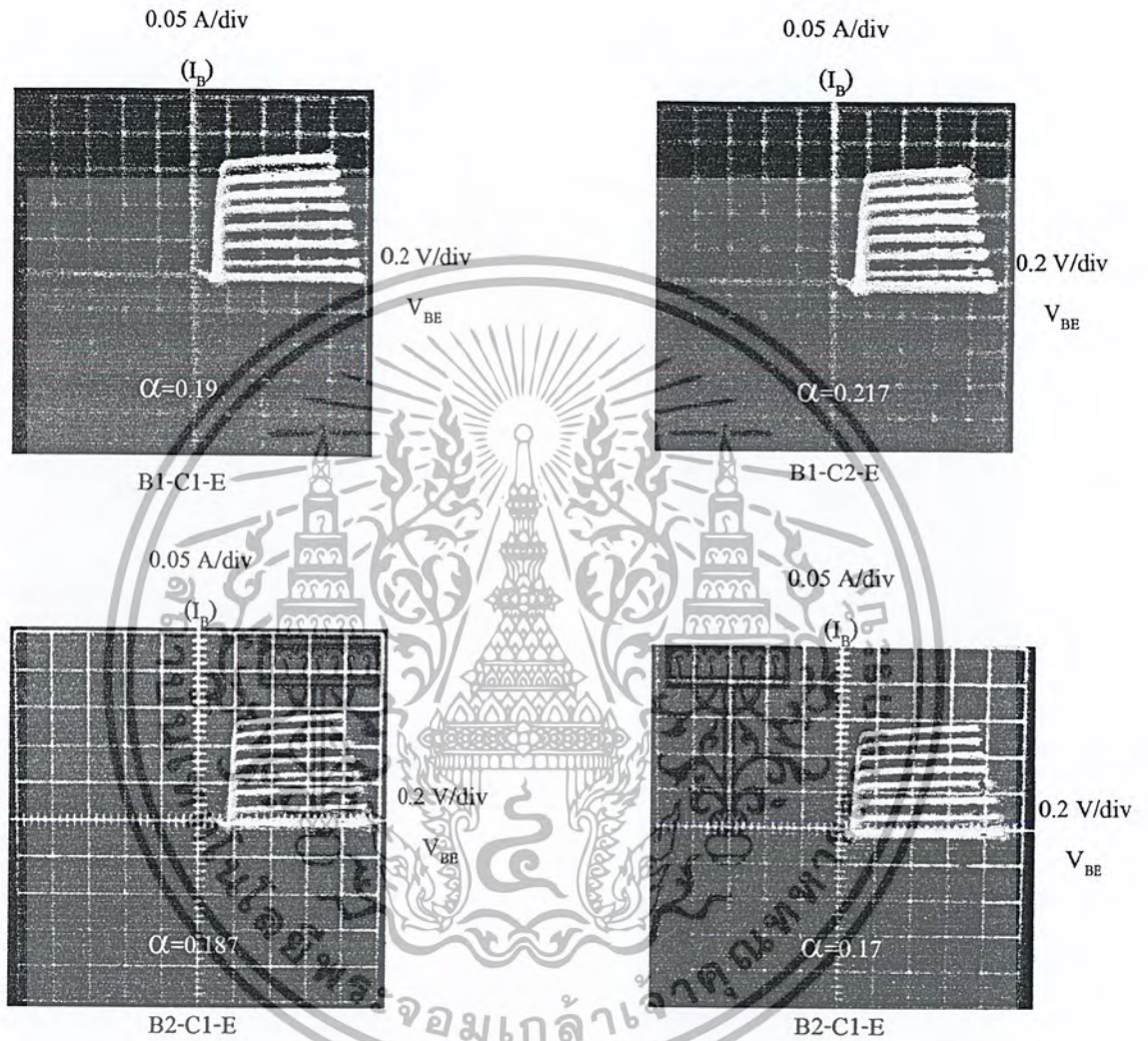


รูปที่ 5.3 แสดงรูปกราฟคุณสมบัติไบโพลาร์แบบคอมมอนอิมิตเตอร์

จากการทดลองนี้จะได้ค่า $\beta \approx 0.2$ โดยค่า β หาได้จาก $\beta = I_c / I_B$ และวิธีที่คำนวณจากกราฟ ตัวอย่างเช่น ในรอยต่อ B1-C1-E ในกราฟจะ I_B ที่ค่าต่างๆ อยู่ 8 ค่า ให้ทำการเลือกมาหนึ่งค่า ในที่นี้ของเลือก I_B เส้นที่ 4 วิธีการหาค่า I_B คือ $I_B = (I/div \times step) / V_{CE}$ ในรอยต่อ B1-C1-E คำนวณค่า I_B ได้ 0.25mA ดังนั้น ค่า $\beta = 0.24$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 คอมมอนเบส



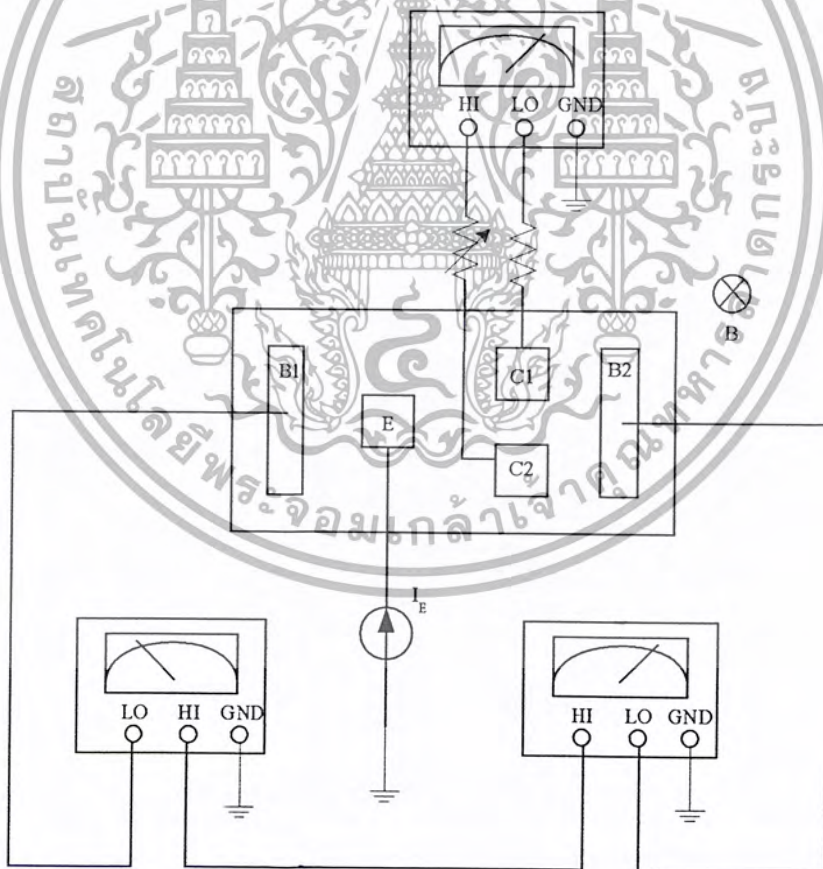
รูปที่ 5.4 แสดงรูปกราฟคุณสมบัติไบโพลาร์แบบคอมมอนเบส

จากผลการทดลองจะได้ค่า $\alpha \approx 0.191$ ซึ่งเป็นการวัดกราฟคุณสมบัติไบโพลาร์แบบคอมมอนเบส ซึ่งในการคำนวณจะทำการคำนวณจากค่า β โดยมีสมการคือ $\alpha = \beta / (1 + \beta)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

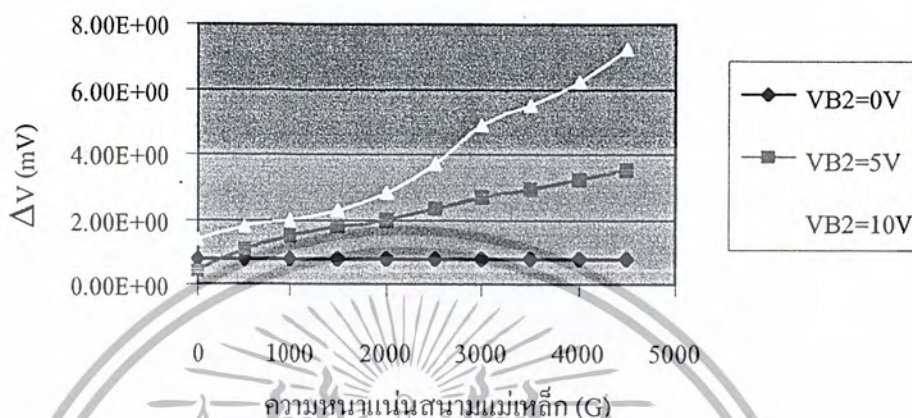
นำอุปกรณ์ที่ต่อขาเรียบร้อยแล้วติดตั้งบนเครื่องผลิตสนามแม่เหล็ก เพราะว่าเนื่องจากตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบ Lateral ซึ่งมีกระแสไหลตามแนวนอน ใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของกระแส นั่นคือการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง ฉะนั้นการติดตั้งสามารถวางอุปกรณ์ในแนวราบลงกับพื้นเครื่องผลิตสนามแม่เหล็กได้เสีย โดยต้องระวังในเรื่องของระนาบให้เรียบสม่ำเสมอด้วย ในการให้ไบอัสเข้ากับวงจรไบอัส ซึ่งต่อแยกอยู่นอกเครื่องผลิตสนามแม่เหล็ก เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่อาจจะเกิดขึ้นได้ การไบอัสแมกนีโตทรานซิสเตอร์โดยการจ่ายกระแสตรงที่ให้กับขาอิมิตเตอร์ เพื่อช้ช้ข้ข้การไหลของกระแส I_E ที่ไหลจากอิมิตเตอร์ไปยังคอลเลคเตอร์ ส่วนขาของ C_1 ต่อกับความต้านทานคงที่ และ C_2 ต่อกับความต้านทานปรับค่าได้ เพื่อปรับออฟเซต



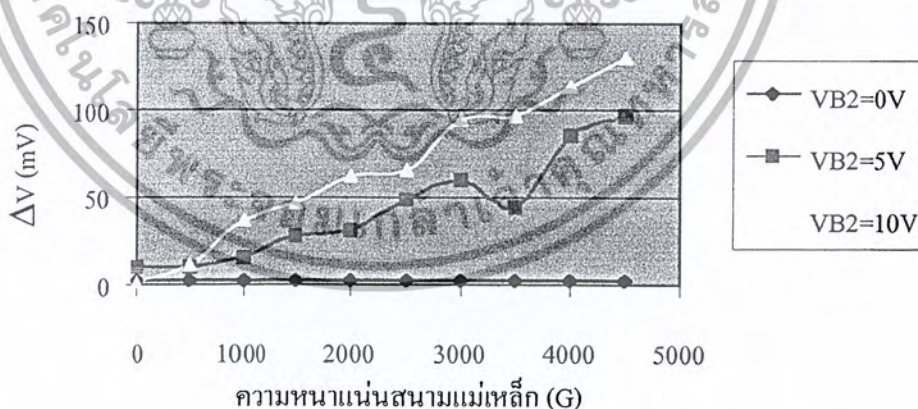
รูปที่ 5.5 แสดงการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดผลการตอบสนองแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงรายละเอียดการตอบสนองสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์

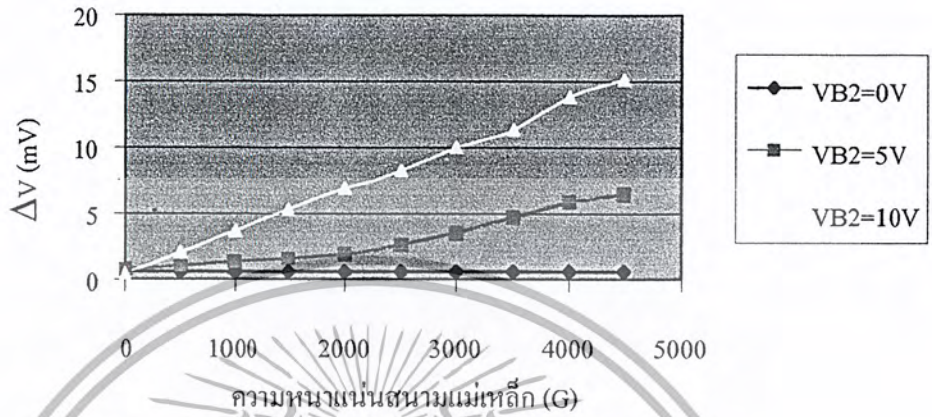


รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน ΔV กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก $I_E=100\mu A$ $W=20\mu m$ $L=20\mu m$ (ภาคผนวก ง. ตารางการทดลองที่ 1-3)



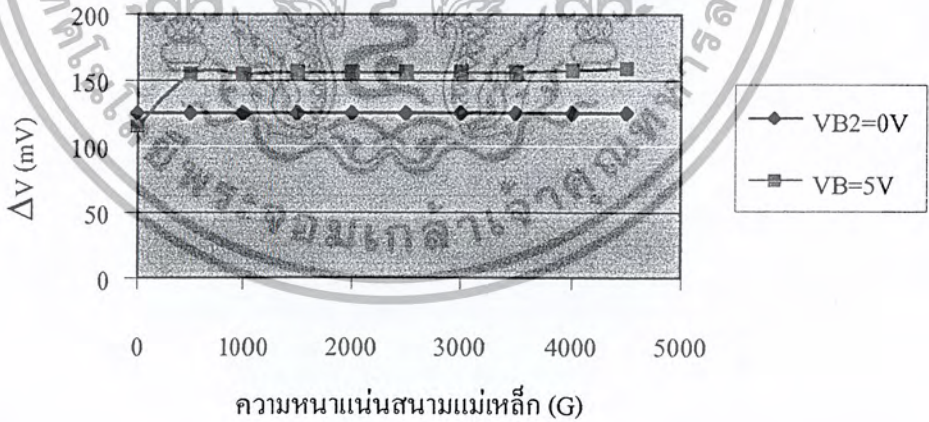
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน ΔV กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก $I_E=300\mu A$ $W=20\mu m$ $L=20\mu m$ (ภาคผนวก ง. ตารางการทดลองที่ 4-6) /

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน ΔV กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

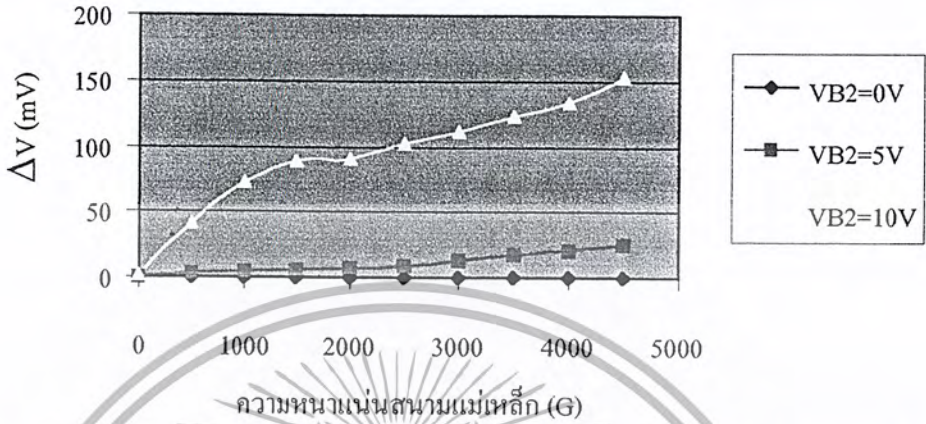
$I_E=100\mu A$ $W=20\mu m$ $L=10\mu m$ (ภาคผนวก ง. ตารางการทดลองที่ 7-9)



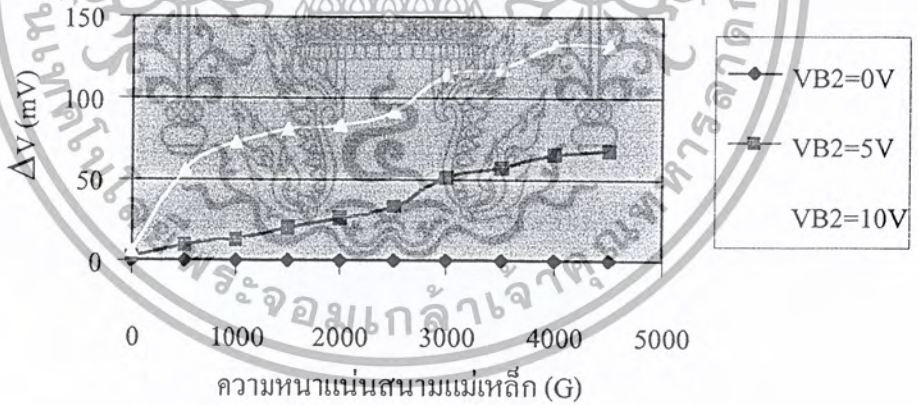
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน ΔV กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

$I_E=300\mu A$ $W=20\mu m$ $L=10\mu m$ (ภาคผนวก ง. ตารางการทดลองที่ 10-11) /

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน ΔV กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก $I_E=100\mu A$ $W=10\mu m$ $L=20\mu m$ (ภาคผนวก ง. ตารางการทดลองที่ 12-14)



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงแรงดัน ΔV กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก $I_E=300\mu A$ $W=10\mu m$ $L=20\mu m$ (ภาคผนวก ง. ตารางการทดลองที่ 15-17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองการตอบสนองแม่เหล็ก

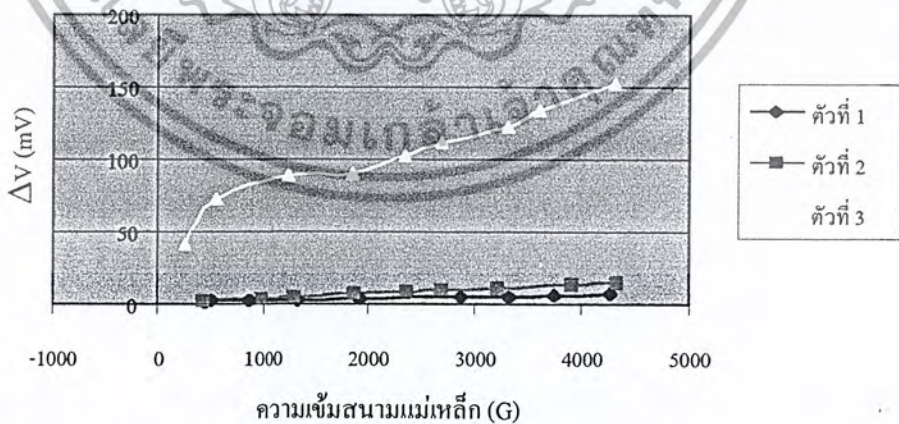
จากกราฟที่ เป็นการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กในพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากกราฟรูปที่ 5.6 และ 5.7 แมกนีโตทรานซิสเตอร์มีพารามิเตอร์ $W = 20$ และ $L = 20$ กราฟจะมีความเป็นลิเนียร์ต่ำมาก ถึงแม้จะให้ไบอัส I_E และ V_{B2} ค่าต่ำก็ตาม
2. จากกราฟรูปที่ 5.8 และ 5.9 แมกนีโตทรานซิสเตอร์มีพารามิเตอร์ $W = 20$ และ $L = 10$ กราฟจะมีความเป็นลิเนียร์สูง ถึงแม้จะให้ไบอัส I_E และ V_{B2} ค่าสูงก็ตาม
3. จากกราฟรูปที่ 5.10 และ 5.11 แมกนีโตทรานซิสเตอร์มีพารามิเตอร์ $W = 10$ และ $L = 20$ กราฟจะมีความเป็นลิเนียร์เมื่อป้อนค่าไบอัส I_E และ V_{B2} ต่ำ แต่จะให้ค่า ΔV สูงเมื่อให้ไบอัส I_E และ V_{B2} ค่าสูงๆ
4. ส่วนค่าพารามิเตอร์ $W = 10$ และ $L = 10$ ไม่สามารถที่จะทำการทดลองใดๆ ได้เนื่องจากเกิดความเสียหายระหว่างกระบวนการสร้าง

5.4 ทดลองการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์กับวงจรประยุกต์ใช้งาน

การทดลองผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์กับวงจรประยุกต์ใช้งาน โดยจะทำการเลือกค่าที่มีความเป็นลิเนียร์สูงที่สุดในการทดลองครั้งนี้ โดยจะเลือกค่า $I_E = 100 \mu A$ และ $V_{B2} = 10V$

แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีโตทรานซิสเตอร์กับวงจรประยุกต์ใช้งาน



รูปที่ 5.12 แสดงรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีโตทรานซิสเตอร์กับวงจรประยุกต์ใช้งาน เมื่อ $I_E = 100 \mu A$ และ $V_{B2} = 10V$ ที่พารามิเตอร์ค่าต่างๆ (ภาคผนวก ง. ตารางการทดลองที่ 18-20)

สรุปผลการทดลอง

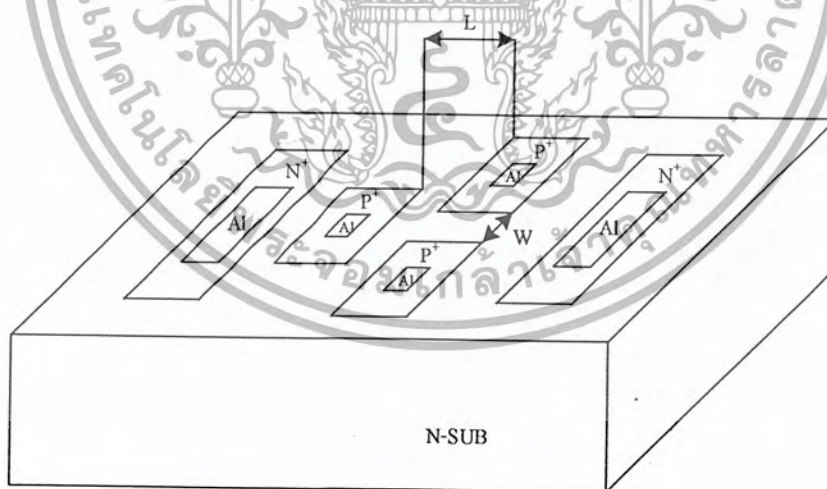
จากการทดลองนี้จะเห็นว่าพารามิเตอร์ $W=20$ $L=20$ (ตัวที่ 1) และ $W=20$ $L=10$ (ตัวที่ 2) จะมีความเป็นลิเนียร์มากกว่าพารามิเตอร์ที่ $W=10$ $L=20$ (ตัวที่ 3) โดยแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ตั้งแต่ 500 – 4500 G ส่วนแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตัวที่ 3 นั้น ในช่วงสนามแม่เหล็กประมาณ 500 – 2000 G จะไม่มีความเป็นลิเนียร์แต่เมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กมากกว่า 2000G ไปแล้วจะมีประสิทธิภาพมากขึ้น



บทที่ 6

บทสรุป

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ได้ทำการสร้างและการทดลองนี้ได้ทำมาจากโครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ และมีกระแสไหลตามแนวอนซึ่งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก และใช้หลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ ในการเบี่ยงเบนของกระแสคอลเลคเตอร์ C1 และ C2 ซึ่งเป็นการสร้างทรานซิสเตอร์ชนิด P-N-P สร้างบนแผ่นซิลิกอนที่มีระนาบ (100) ชนิดเอ็น โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์นี้จะประกอบไปด้วยขาส ซึ่งมีส่วนฐานของคอลเลคเตอร์ 2 ขา เบส 2 ขา และ อิมิตเตอร์ 1 ขา ส่วนชั้นสารคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์จะได้อุปด้วยสารโบรอนซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี และชั้นสารเบสจะได้อุปด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นในที่นี้จะใช้ฟอสฟอรัส ซึ่งเมื่อสร้างเสร็จแล้ว จะทำการทดสอบบริเวณรอยต่อระหว่างรอยต่อขาต่างๆ ของตัวแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ซึ่งทดสอบแล้วจะเป็นรอยต่อ P-N ยกเว้นรอยต่อของ B1-B2 และ C1-C2 ซึ่งมีลักษณะเป็นความต้านทาน จากนั้นจะทำการทดสอบคุณสมบัติความเป็นทรานซิสเตอร์ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ได้ทำการออกแบบไว้ 4 พารามิเตอร์ด้วยกัน คือระยะห่างระหว่างชั้นสาร C1-C2 คือ W และระยะห่างระหว่างชั้นสาร E-C คือ L



รูปที่ 6.1 แสดงรูปร่างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

พารามิเตอร์	W (μm)	L (μm)
1	20	20
2	20	10
3	10	20
4	10	10

ตารางที่ 6.1 ตารางค่าพารามิเตอร์ ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 ตัว

ซึ่งเมื่อทำการไบอัสให้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะเป็นวงจรไบอัสแบบคอมมอนเบส ซึ่งอินพุตจะให้กระแสที่เข้าทางขั้วอิมิตเตอร์ และสัญญาณทางด้านเอาพุตจะออกทางขาคอลเลคเตอร์ทั้งสอง และขา B2 กับแรงดันและขา B1 ต่อกับกราวด์ เป็นตัวช่วยเร่งให้กระแสจากอิมิตเตอร์ ไปถึงคอลเลคเตอร์จากการทดลองให้ไบอัสโดยไม่มีสนามแม่เหล็ก เมื่อป้อน $V_{B2} = 0\text{V}$ จะทำให้แรงดันตกคร่อม $RC1$ และ $RC2$ น้อยมาก เมื่อให้ V_{B2} มากขึ้นแรงดันที่ตกคร่อม $RC1$ และ $RC2$ จะมากขึ้นตามแรงดันให้กับ V_{B2} แต่เมื่อวัดแรงดันที่ตกคร่อม ความต้านทานระหว่างขา $C1$ กับขา $C2$ ซึ่งน่าจะเท่ากัน $\Delta V_C = 0\text{ mV}$ แต่เมื่อวัดจริงกับไม่เท่ากัน เนื่องจากกระบวนการสร้าง และการแพร่อะตอมสารเจือ มีความไม่สม่ำเสมอกัน วิธีการแก้ไขคือ โดยการใช้ตัวความต้านทานปรับค่าได้เพื่อให้ $\Delta V = 0$ ก่อนที่จะมีสนามแม่เหล็ก เมื่อให้สนามแม่เหล็กแก่แมกนีโตทรานซิสเตอร์ เริ่มต้นจ่ายกระแส $I_E = 100\mu\text{A}$ เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าแรง ΔV_C จะคงที่ตลอด จะไม่เปลี่ยนแปลงต่อสนามแม่เหล็กที่รับเข้ามา แต่เมื่อให้ $V_{B2} = 5\text{V}$ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ จะเริ่มทำงานเมื่อมีสนามแม่เหล็ก กระแสที่ไหลจากอิมิตเตอร์มายังขาคอลเลคเตอร์ทั้งสองจะถูกเบี่ยงเบน ทำให้กระแสไปยัง $C1$ ทำให้แรงดันตกคร่อม $RC1$ มากกว่า $RC2$ ทำให้เกิด ΔV_C ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มสนามแม่เหล็ก

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่สร้างขึ้นมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีค่า $\beta \approx 0.2$ และค่า $\alpha \approx 0.19$ ที่อัตราส่วน $W=20\mu\text{m}$ $L=10\mu\text{m}$ มี Sensitivity ดีที่สุดที่กระแส $I_E=100\mu\text{A}$ $V_{B2}=10\text{V}$ โดยใช้งานในช่วงสนามแม่เหล็ก 0-4500 G และรองลงมาที่อัตราส่วน $W=20\mu\text{m}$ $L=20\mu\text{m}$ กระแส $I_E=100\mu\text{A}$ $V_{B2}=5\text{V}$ และสุดท้ายที่อัตราส่วน $W=10\mu\text{m}$ $L=20\mu\text{m}$ กระแส $I_E=100\mu\text{A}$ $V_{B2}=10\text{V}$ และใช้งานในช่วงสนามแม่เหล็ก 0-4500 G

ดังนั้นการเลือกแมกนีโตทรานซิสเตอร์ไปใช้งาน ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับการใช้งาน สำหรับวัตถุประสงค์การสร้างครั้งนี้ก็เพื่อการเลือกใช้งานเป็น Magnetic sensor จากการสร้างทั้งหมด ถือว่าแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีอัตราส่วน $W=20\mu\text{m}$ $L=10\mu\text{m}$ ที่กระแส $I_E=100\mu\text{A}$ ถือว่าดีที่สุด เพราะมีความเป็นลิเนียร์สูง ใช้งานได้ตลอดช่วง 0-4500 G

แนวทางการพัฒนาจะเห็นได้ว่าถ้าให้กระแส IE มากๆ การตอบสนองสนามแม่เหล็กจะไม่มีความเป็นลิเนียร์ ซึ่งพื้นฐานรองควรมีความเข้มของสารเจือปนน้อยๆ ถ้าจะให้ดีควมสร้างชั้นอิพิแทกเซียล เพื่อให้การกระจายของอะตอมมีความสม่ำเสมอ และระยะ W และระยะ L มีผลต่อการตอบสนองสนามแม่เหล็ก



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. สัญลักษณ์

B	สนามแม่เหล็ก (T=เทสลา)
F	แรงลอเรนซ์ (N=นิวตัน)
β	เบต้าที่คำนวณได้
α	อัลฟาที่คำนวณได้
I	กระแส (mA)
J_n	ความหนาแน่นกระแส (mA/cm^2)
L	ความยาวระหว่างขั้วอิเล็กโตรดกับคอลเลคเตอร์
W	ความกว้างระหว่างขั้วคอลเลคเตอร์ 1 กับคอลเลคเตอร์ 2
n	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ
N_A	ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือชนิดพี (cm^{-3})
N_D	ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือชนิดเอ็น (cm^{-3})
r_n	สัมประสิทธิ์ฮอลล์ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
r_p	สัมประสิทธิ์ฮอลล์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี
R_H	สัมประสิทธิ์ฮอลล์ (cm^3)
σ_n	ความนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอน ($\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$)
σ_{nB}	ความนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอน ขณะจ่ายสนามแม่เหล็ก ($\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$)
μ_n	ความคล่องตัวของประจุพาหะอิเล็กตรอน ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$)
μ_p	ความคล่องตัวของประจุพาหะโฮล ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$)
ρ	พิกัดความต้านทาน ($\Omega\text{-cm}$)
ϵ	สนามไฟฟ้า (V/m)

/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข. ค่าคงที่และการแปลงหน่วย	
ข.1 ค่าคงที่	
สัมประสิทธิ์ฮอลล์ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	$r_n = 1.15$
สัมประสิทธิ์ฮอลล์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี	$r_p = 0.7$
ความคล่องตัวของประจุพาหะอิเล็กตรอน	$\mu_n = 1400$
ความคล่องตัวของประจุพาหะโฮล	$\mu_p = 480$
ประจุไฟฟ้า	$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
ค่าคงที่โบสแมน	$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
ค่าคงที่ของพลังค์	$h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ J-S}$
ข.2 การแปลงหน่วย	
1 T (เทสลา) = 10^4 Gauss หรือ 1 wb/m^2	
1 Å (angstrom) = 10^{-10} m	
1 mil = $25.4 \text{ } \mu\text{m}$	
1 eV = $1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$	



/

ภาคผนวก ก. กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์และรูปเครื่องมือในการสร้าง

ค.1 กระบวนการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์มีขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิกอนและการเช็คุณภาพ

- แผ่นซิลิกอนชนิดเอ็นระนาบ (100)
- พิกัดความต้านทาน 2-4 Ω -cm
- ความหนา 400 μ m

2. การทำความสะอาดผิวหน้าซิลิกอนครั้งแรก

- Ultrasonic ในน้ำบริสุทธิ์ (Deionized Water) 2 นาที
- จุ่มน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรด HNO_3 10 นาที
- จุ่มน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

3. การทำความสะอาดผิวหน้าซิลิกอน แบบมาตรฐาน

- ต้มใน Trichloroethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 3 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

4. การ Slice etching

- จุ่มในสารละลาย HF5% 10 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

5. กระบวนการออกซิเดชัน

- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min 3 ชั่วโมง
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1000 cc/min 1 ชั่วโมง
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min 2 ชั่วโมง

ใช้อุณหภูมิเตา 1500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิน้ำ 90 องศาเซลเซียส

6. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาร์คที่ 1 (Base)

- อบแผ่นไต่ความชื้นที่ $120^\circ C$ 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (way coat) spin 5000 rpm
- อบฟิล์ม $95^\circ C$ 30 นาที (prebake)
- Alignment Expose
- Develop ฟิล์มโดย
- จุ่มลงใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที
- จุ่มลงใน Xylene แก้วที่สอง 90 วินาที
- จุ่มลงใน Isopropy Alcohol แก้วที่หนึ่ง 30 นาที
- จุ่มลงใน Isopropy Alcohol แก้วที่สอง 30 นาที
- จุ่มลงใน Isopropy Alcohol แก้วที่สาม 30 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2
- อบฟิล์มที่ $95^\circ C$ 20 นาที
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ $95^\circ C$ 30 นาที

7. การใช้สารละลายกัด ชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มในน้ำสารละลาย Buffer
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วหนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วสอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

8. กระบวนการลอกฟิล์ม

- คัดใน H_2SO_4 แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- คัดใน H_2SO_4 แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- คัดในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- คัดในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วหนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วสอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

9. การทำความสะอาดผิวหน้าซิลิกอน

- คัดใน Trichloethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 3 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วหนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วสอง 5 นาที
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

10. กระบวนการ Slice etching

- จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วหนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วสอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

11. กระบวนการ Pre-deposition

- Phosphorus deposition Temp 950 °C
- เคลือบแผ่นด้วย ฟอสฟอรัสชนิดเหลวแล้ว สปิน 5000 รอบ/นาที
- อบแผ่น 10 นาที ที่ 90 °C
- deposition ด้วย N_2 700 cc/min 20 นาที

12. การลอกชั้น Phosphorus glass

- จุ่มในสารละลาย HF 5%
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง

- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง

- เป่าให้แห้งด้วย N_2

13. การทำความสะอาดผิวหน้า

- ดั้มใน Trichloethylene 5 นาที

- Ultrasonic ใน Acetone 3 นาที

- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง

- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง

- เป่าให้แห้งด้วย N_2

14. กระบวนการ Drive in Boron drive in Temp 1100 °C

- Dry ด้วย O_2 1200 cc/min 20 นาที

- Wet ด้วย O_2 1000 cc/min 20 นาที

- Dry ด้วย O_2 1200 cc/min 20 นาที

15. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาร์กที่ 2 (อิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 120 °C 30 นาที

- เคลือบนำยาไวแสงชนิดลบ (way coat) spin 5000 rpm

- อบฟิล์มที่ 95 °C 30 นาที (prebake)

- Alignment Expose

- Develop ฟิล์มโดย

- จุ่มลงใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที

- จุ่มลงใน Xylene แก้วที่สอง 90 นาที

- จุ่มลงใน Isopropy Alcohol แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที

- จุ่มลงใน Isopropy Alcohol แก้วที่สอง 30 วินาที

- จุ่มลงใน Isopropy Alcohol แก้วที่สาม 30 วินาที

- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง

- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง

- เป่าให้แห้งด้วย N_2

- อบฟิล์มที่ 95 °C 20 นาที (post bake)

- เคลือบฟิล์มด้านหลัง

- อบฟิล์มที่ 95 °C 30 นาที

16. Oxide Etching

- จุ่มในน้ำสารละลาย Buffer
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N₂

17. กระบวนการลอกฟิล์ม

- ดมใน H₂ SO₄ แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ดมใน H₂ SO₄ แก้วที่สอง 5 นาที
- ดมในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ดมในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N₂

18. การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิกอน

- ดมใน Trichloroethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 3 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- เป่าให้แห้งด้วย N₂

19. การ Slice etching

- จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N₂

20. กระบวนการ Pre-deposition Boron deposition Temp 950 °C

- เคลือบแผ่นด้วยโบรอนชนิดเหลวแล้ว สปิน 5000 รอบ/นาที 10 วินาที
- อบแผ่น 10 นาที ที่ 90 °C



- Deposit ด้วย N_2 700 cc/min 20 นาที
- สร้าง Boron glass ด้วย O_2 700 cc/min 5 นาที

21. ลอกชั้น Boron glass

- จุ่มในสารละลาย HF 5%
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

22. กวรถำความสะอาดผิวหน้า

- คัดใน Trichloethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 3 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง

23. กระบวนการ Drive in

Phosphorus drive in Temp $1100^\circ C$

- Dry ด้วย O_2 1200 cc/min 30 นาที
- Wet ด้วย O_2 1000 cc/min 30 นาที
- Dry ด้วย O_2 1200 cc/min 30 นาที

24. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาร์กที่ 3 (จินโดว์)

- อบแผ่น ได้ความชื้นที่ $120^\circ C$ 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (way coat) spin 5000 rpm
- อบฟิล์มที่ $95^\circ C$ 30 นาที
- Alignment Expose
- Develop ฟิล์มโดย
- จุ่มลงใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 นาที
- จุ่มลงใน Xylene แก้วที่สอง 90 นาที
- จุ่มลงใน Isopropy Alcohol แก้วที่หนึ่ง 30 นาที
- จุ่มลงใน Isopropy Alcohol แก้วที่สอง 30 นาที
- จุ่มลงใน Isopropy Alcohol แก้วที่สาม 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2
- อบฟิล์มที่ $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 20 นาที (post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 30 นาที

25. Oxide Etching

- จุ่มในน้ำสารละลาย Buffer
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

26. กระบวนการลอกฟิล์ม

- ต้มใน H_2SO_4 แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มใน H_2SO_4 แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

27. การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิกอน

- ต้มใน Trichloethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 3 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

28. การเคลือบชั้นอนุกรมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator ที่ความดัน 1×10^{-6} Torr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

29. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาร์กที่ 4 (ลวดลายอลูมิเนียม)

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (Az) spin 5000 rpm
- อบฟิล์มที่ 85 °C 20 นาที (prebake)
- Alignment Expose
- Develop ฟิล์มโดย
- Az Develop แก้วที่หนึ่ง 30 นาที
- Az Develop แก้วที่สอง 30 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N₂
- อบฟิล์มที่ 85 °C 20 นาที (post bake)

30. การสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al Etching)

- จุ่มลงในสารละลาย Al Etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40 °C
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N₂

31. กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงใน Acetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มลงใน Acetone แก้วที่สอง 1 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N₂

32. กระบวนการ Sintering Temp 500 °C

- Dry N₂ 1000 cc/min 12 นาที

ภาคผนวก ง. ตารางผลการทดลอง

ง.1 ตารางผลการทดลองการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

ตารางแสดงผลการทดลองที่ 1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ $L=20\mu\text{m}$ $w=20\mu\text{m}$

เมื่อป้อนกระแส $I_E=100\mu\text{A}$, $V_{B2}=0\text{V}$ แรงดันก่อนปรับ $\Delta V=0.8\text{mV}$

สนามแม่เหล็ก (G)	$R_{C1} = 30\text{K}$	$R_{C2} = 30\text{K}$	ΔV (mV)
	V_{RC1}	V_{RC2}	
0	0.4968	0.496	0.8
500	0.4968	0.496	0.8
1000	0.4968	0.496	0.8
1500	0.4968	0.496	0.8
2000	0.4968	0.496	0.8
2500	0.4968	0.496	0.8
3000	0.4968	0.496	0.8
3500	0.4968	0.496	0.8
4000	0.4968	0.496	0.8
4500	0.4968	0.496	0.8

ตารางแสดงผลการทดลองที่ 2 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ $L=20\mu\text{m}$ $w=20\mu\text{m}$
เมื่อป้อนกระแส $I_E = 100\mu\text{A}$ $V_{B2} = 5\text{V}$ แรงดันก่อนปรับ $\Delta V = 18.06\text{mV}$

สนามแม่เหล็ก (G)	$R_{C1} = 30\text{K}$	$R_{C2} = 40\text{K}$	$\Delta V(\text{mV})$
	V_{RC1}	V_{RC2}	
0	1.2669	1.2665	0.4
500	1.2706	1.2695	1.1
1000	1.2606	1.2591	1.5
1500	1.2606	1.2588	1.8
2000	1.2605	1.2585	2
2500	1.2606	1.2583	2.3
3000	1.2607	1.2580	2.7
3500	1.2608	1.2579	2.9
4000	1.2609	1.2577	3.2
4500	1.2611	1.2576	3.5

ตารางแสดงผลการทดลองที่ 3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ $L=20\mu\text{m}$ $w=20\mu\text{m}$
เมื่อป้อนกระแส $I_E = 100\mu\text{A}$ $V_{B2} = 10\text{V}$ แรงดันก่อนปรับ $\Delta V = 15.9\text{mV}$

สนามแม่เหล็ก (G)	$R_{C1} = 30\text{K}$	$R_{C2} = 50\text{K}$	$\Delta V(\text{mV})$
	V_{RC1}	V_{RC2}	
0	1.5977	1.5963	1.4
500	1.5981	1.5962	1.8
1000	1.5976	1.5956	2
1500	1.59695	1.5947	2.25
2000	2.5971	1.5943	2.8
2500	1.5976	1.5939	3.7
3000	1.5983	1.5943	4.9
3500	1.5985	1.5930	5.5
4000	1.5988	1.5926	6.2
4500	1.5991	1.5920	7.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการทดลองที่ 4 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ $L=20\mu\text{m}$ $w=20\mu\text{m}$

เมื่อป้อนกระแส $I_E = 300\mu\text{A}$ $V_{B2} = 0\text{V}$ แรงดันก่อนปรับ $\Delta V = 25.122\text{mV}$

สนามแม่เหล็ก (G)	$R_{C1} = 30\text{K}$	$R_{C2} = 90\text{K}$	$\Delta V(\text{mV})$
	V_{RC1}	V_{RC2}	
0	4.450	4.4473	2.7
500	4.450	4.4473	2.7
1000	4.450	4.4473	2.7
1500	4.450	4.4473	2.7
2000	4.450	4.4473	2.7
2500	4.450	4.4473	2.7
3000	4.450	4.4473	2.7
3500	4.450	4.4473	2.7
4000	4.450	4.4473	2.7
4500	4.450	4.4473	2.7

ตารางแสดงผลการทดลองที่ 5 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ $L=20\mu\text{m}$ $w=20\mu\text{m}$

เมื่อป้อนกระแส $I_E = 300\mu\text{A}$ $V_{B2} = 5\text{V}$ แรงดันก่อนปรับ $\Delta V = 0.366\text{mV}$

สนามแม่เหล็ก (G)	$R_{C1} = 30\text{K}$	$R_{C2} = 30\text{K}$	$\Delta V(\text{mV})$
	V_{RC1}	V_{RC2}	
0	4.6368	4.6265	10.3
500	4.6268	4.6170	9.8
1000	4.6095	4.5945	15.8
1500	4.6215	4.5940	27.5
2000	4.6243	4.5932	31.1
2500	4.6386	4.5894	49.2
3000	4.6489	4.5892	59.7
3500	4.6300	4.5850	45
4000	4.6703	4.5842	86.1
4500	4.6797	4.5832	96.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการทดลองที่ 6 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ $L=20\mu\text{m}$ $w=20\mu\text{m}$

เมื่อป้อนกระแส $I_E = 300\mu\text{A}$ $V_{B2} = 10\text{V}$ แรงดันก่อนปรับ $\Delta V = 0.568\text{mV}$

สนามแม่เหล็ก (G)	$R_{C1} = 30\text{K}$	$R_{C2} = 30\text{K}$	ΔV (mV)
	V_{RC1}	V_{RC2}	
0	4.7033	4.7023	1
500	4.701	4.6895	11.5
1000	4.7225	4.6856	36.9
1500	4.7282	4.6820	46.2
2000	4.7438	4.6816	62.2
2500	4.7458	4.6802	65.6
3000	4.7732	4.6762	95.0
3500	4.7643	4.6678	96.6
4000	4.7811	4.6676	113.5
4500	4.7970	4.6670	130.3

ตารางแสดงผลการทดลองที่ 7 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ $L=10\mu\text{m}$ $w=20\mu\text{m}$

เมื่อป้อนกระแส $I_E = 100\mu\text{A}$ $V_{B2} = 0\text{V}$ แรงดันก่อนปรับ $\Delta V = 9.87\text{mV}$

สนามแม่เหล็ก (G)	$R_{C1} = 30\text{K}$	$R_{C2} = 33.8\text{K}$	ΔV (mV)
	V_{RC1}	V_{RC2}	
0	2.6595	2.6589	0.6
500	2.6595	2.6589	0.6
1000	2.6595	2.6589	0.6
1500	2.6595	2.6589	0.6
2000	2.6595	2.6589	0.6
2500	2.6595	2.6589	0.6
3000	2.6595	2.6589	0.6
3500	2.6595	2.6589	0.6
4000	2.6595	2.6589	0.6
4500	2.6595	2.6589	0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการทดลองที่ 8 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ $L=10\mu\text{m}$ $w=20\mu\text{m}$
เมื่อป้อนกระแส $I_E = 100\mu\text{A}$ $V_{B2} = 5\text{V}$ แรงดันก่อนปรับ $\Delta V = 3.42\text{mV}$

สนามแม่เหล็ก (G)	$R_{C1} = 30\text{K}$	$R_{C2} = 42.2\text{K}$	ΔV (mV)
	V_{RC1}	V_{RC2}	
0	2.6916	2.6909	0.7
500	2.6912	2.6901	1.1
1000	2.6901	2.6888	1.3
1500	2.6903	2.6887	1.6
2000	2.6905	2.6886	1.9
2500	2.6885	2.6859	2.64
3000	2.6891	2.6856	3.5
3500	2.6897	2.6850	4.7
4000	2.6901	2.6848	5.9
4500	2.6906	2.6841	6.5

ตารางแสดงผลการทดลองที่ 9 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ $L=10\mu\text{m}$ $w=20\mu\text{m}$
เมื่อป้อนกระแส $I_E = 100\mu\text{A}$ $V_{B2} = 10\text{V}$ แรงดันก่อนปรับ $\Delta V = 30\text{mV}$

สนามแม่เหล็ก (G)	$R_{C1} = 30\text{K}$	$R_{C2} = 38.6\text{K}$	ΔV (mV)
	V_{RC1}	V_{RC2}	
0	2.7078	2.7073	0.5
500	2.7079	2.7058	2.1
1000	2.7089	2.7052	3.7
1500	2.7102	2.7049	5.3
2000	2.7111	2.7042	6.9
2500	2.7080	2.6997	8.3
3000	2.7089	2.6989	10
3500	2.7094	2.6981	11.3
4000	2.7115	2.6977	13.8
4500	2.7123	2.6971	15.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการทดลองที่ 10 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ $L=10\mu\text{m}$ $w=20\mu\text{m}$

เมื่อป้อนกระแส $I_E = 300\mu\text{A}$ $V_{B2} = 0\text{V}$ แรงดันก่อนปรับ $\Delta V = 31.86\text{mV}$

สนามแม่เหล็ก (G)	$R_{C1} = 30\text{K}$	$R_{C1} = 39\text{K}$	ΔV (mV)
	V_{RC1}	V_{RC2}	
0	8.340	8.2143	125
500	8.340	8.2143	125
1000	8.340	8.2143	125
1500	8.340	8.2143	125
2000	8.340	8.2143	125
2500	8.340	8.2143	125
3000	8.340	8.2143	125
3500	8.340	8.2143	125
4000	8.340	8.2143	125
4500	8.340	8.2143	125

ตารางแสดงผลการทดลองที่ 11 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ $L=10\mu\text{m}$ $w=20\mu\text{m}$

เมื่อป้อนกระแส $I_E = 300\mu\text{A}$ $V_{B2} = 5\text{V}$ แรงดันก่อนปรับ $\Delta V = 10.127\text{mV}$

สนามแม่เหล็ก (G)	$R_{C1} = 30\text{K}$	$R_{C2} = 53.7\text{K}$	ΔV (mV)
	V_{RC1}	V_{RC2}	
0	8.6137	8.4992	114.5
500	8.6532	8.4984	154.8
1000	8.6523	8.4972	155.1
1500	8.6520	8.4965	155.5
2000	8.6518	8.4960	155.8
2500	8.6519	8.4958	156.1
3000	8.6518	8.4955	156.3
3500	8.6520	8.4955	156.5
4000	8.6530	8.4951	157.9
4500	8.6539	8.4949	159

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการทดลองที่ 12 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ $L=20\mu\text{m}$ $W=10\mu\text{m}$

เมื่อป้อนกระแส $I_E = 100\mu\text{A}$ $V_{B2} = 0\text{V}$ แรงดันก่อนปรับ $\Delta V = 38.1\text{mV}$

สนามแม่เหล็ก (G)	$R_{C1} = 30\text{K}$	$R_{C2} = 95\text{K}$	ΔV (mV)
	V_{RC1}	V_{RC2}	
0	0.8043	0.8050	0.7
500	0.8043	0.8050	0.7
1000	0.8043	0.8050	0.7
1500	0.8043	0.8050	0.7
2000	0.8043	0.8050	0.7
2500	0.8043	0.8050	0.7
3000	0.8043	0.8050	0.7
3500	0.8043	0.8050	0.7
4000	0.8043	0.8050	0.7
4500	0.8043	0.8050	0.7

ตารางแสดงผลการทดลองที่ 13 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ $L=20\mu\text{m}$ $W=10\mu\text{m}$

เมื่อป้อนกระแส $I_E = 100\mu\text{A}$ $V_{B2} = 5\text{V}$ แรงดันก่อนปรับ $\Delta V = 41.3\text{mV}$

สนามแม่เหล็ก (G)	$R_{C1} = 30\text{K}$	$R_{C1} = 26.1\text{K}$	ΔV (mV)
	V_{RC1}	V_{RC2}	
0	0.8065	0.8051	0.4
500	0.8083	0.8051	3.2
1000	0.8101	0.8051	5
1500	0.8111	0.8051	5.9
2000	0.8128	0.8051	7.7
2500	0.8145	0.8051	9.4
3000	0.8189	0.8050	13.9
3500	0.82306	0.8050	18.06
4000	0.82589	0.8050	20.89
4500	0.8300	0.8050	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการทดลองที่ 14 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ $L=20\mu\text{m}$ $W=10\mu\text{m}$

เมื่อป้อนกระแส $I_E = 100\mu\text{A}$ $V_{B2} = 10\text{V}$ แรงดันก่อนปรับ $\Delta V = 8.09\text{mV}$

สนามแม่เหล็ก (G)	$R_{C1} = 30\text{K}$	$R_{C2} = 17.4\text{K}$	ΔV (mV)
	V_{RC1}	V_{RC2}	
0	0.793	0.792	1
500	0.825	0.784	41
1000	0.860	0.788	72
1500	0.876	0.787	89
2000	0.878	0.788	90
2500	0.888	0.786	102
3000	0.898	0.787	111
3500	0.912	0.789	123
4000	0.932	0.789	134
4500	0.945	0.792	153

ตารางแสดงผลการทดลองที่ 15 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ $L=20\mu\text{m}$ $w=10\mu\text{m}$

เมื่อป้อนกระแส $I_E = 300\mu\text{A}$ $V_{B2} = 0\text{V}$ แรงดันก่อนปรับ $\Delta V = 0.8\text{mV}$

สนามแม่เหล็ก (G)	$R_{C1} = 30\text{K}$	$R_{C2} = 95\text{K}$	ΔV (mV)
	V_{RC1}	V_{RC2}	
0	2.2287	2.2286	0.1
500	2.2287	2.2286	0.1
1000	2.2287	2.2286	0.1
1500	2.2287	2.2286	0.1
2000	2.2287	2.2286	0.1
2500	2.2287	2.2286	0.1
3000	2.2287	2.2286	0.1
3500	2.2287	2.2286	0.1
4000	2.2287	2.2286	0.1
4500	2.2287	2.2286	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการทดลองที่ 16 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ $L=20\mu\text{m}$ $w=10\mu\text{m}$

เมื่อป้อนกระแส $I_E = 300\mu\text{A}$ $V_{B2} = 5\text{V}$ แรงดันก่อนปรับ $\Delta V = 14.2\text{mV}$

สนามแม่เหล็ก (G)	$R_{C1} = 30\text{K}$	$R_{C2} = 23.1\text{K}$	ΔV (mV)
	V_{RC1}	V_{RC2}	
0	1.9991	1.993	2
500	2.0004	1.9910	9.4
1000	2.0040	1.9910	13
1500	2.010	1.9892	20.8
2000	2.014	1.9875	26.5
2500	2.023	1.9892	33.8
3000	2.036	1.9848	51.2
3500	2.042	1.9845	57.5
4000	2.050	1.9843	65.7
4500	2.052	1.9840	68

ตารางแสดงผลการทดลองที่ 17 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ $L=20\mu\text{m}$ $w=10\mu\text{m}$

เมื่อป้อนกระแส $I_E = 300\mu\text{A}$ $V_{B2} = 10\text{V}$ แรงดันก่อนปรับ $\Delta V = 5.7\text{mV}$

สนามแม่เหล็ก (G)	$R_{C1} = 30\text{K}$	$R_{C2} = 20.2\text{K}$	ΔV (mV)
	V_{RC1}	V_{RC2}	
0	1.993	1.9935	6.5
500	2.040	1.9845	55.5
1000	2.055	1.9827	72.3
1500	2.063	1.9820	81
2000	2.066	1.9831	82.9
2500	2.073	1.9811	91.9
3000	2.093	1.9782	114.8
3500	2.095	1.9773	117.7
4000	2.106	1.974	132
4500	2.109	1.977	132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.2 ตารางผลการทดลองแมกนีโตทรานซิสเตอร์กับวงจรประยุกต์ใช้งาน

ตารางผลการทดลองที่ 18 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีค่าพารามิเตอร์ $W = 20\mu\text{m}$ $L = 20\mu\text{m}$

เมื่อป้อนกระแส $I_E = 100\mu\text{A}$ ที่แรงดัน $V_{B_2} = 10\text{V}$

ΔV (mV)	สนามแม่เหล็ก (G)
1.8	453
2	518
2.25	867
2.8	1342
3.7	1924
4.9	2876
5.5	3319
6.2	3752
7.1	4267

ตารางผลการทดลองที่ 19 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีค่าพารามิเตอร์ $W = 20\mu\text{m}$ $L = 10\mu\text{m}$

เมื่อป้อนกระแส $I_E = 100\mu\text{A}$ ที่แรงดัน $V_{B_2} = 10\text{V}$

ΔV (mV)	สนามแม่เหล็ก (G)
2.1	443
3.7	975
5.3	1316
6.9	1870
8.3	2371
10	2697
11.3	3215
13.8	3913
15.2	4326

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 20 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีค่าพารามิเตอร์ $W=10\mu\text{m}$ $L=20\mu\text{m}$
 เมื่อป้อนกระแส $I_E=100\mu\text{A}$ ที่แรงดัน $V_{B2}=10\text{V}$

ΔV (mV)	สนามแม่เหล็ก (G)
41	253
72	548
89	1254
90	1850
102	2345
111	2693
123	3317
134	3601
153	4312



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ. โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม MCS-51

```

#include<reg51.h>
#include<string.h>
#include<math.h>
void delay(unsigned int);
void LCD_CLR();
void LCD_HOME();
void LGD_OFF();
void convert(unsigned int);
void LCD_DATA1(unsigned char *data_send);
void LCD_INI();
void LCD_CLK();
void LCD_ON();
unsigned char read_adc();
void LCD_SETADDR(unsigned char);
void LCD_DATA(unsigned char*);
sbit LCD_RS=P2^0;
sbit LCD_EN=P2^2;
sbit wr=P2^3;
void main()
{
    int datadigit,analogg;
    delay(2000);
    LCD_INI();
    while(1)
    {
        datadigit=read_adc();
        analogg=20*datadigit;

```

```

        convert(analogg);
    }
}

```

```

unsigned char read_adc()

```

```

{
    unsigned char data_adc;
    wr=1;
    delay(100);
    wr=0;
    delay(100);
    wr=1;
    delay(100);
    data_adc=P0;
    return data_adc;
}

```

```

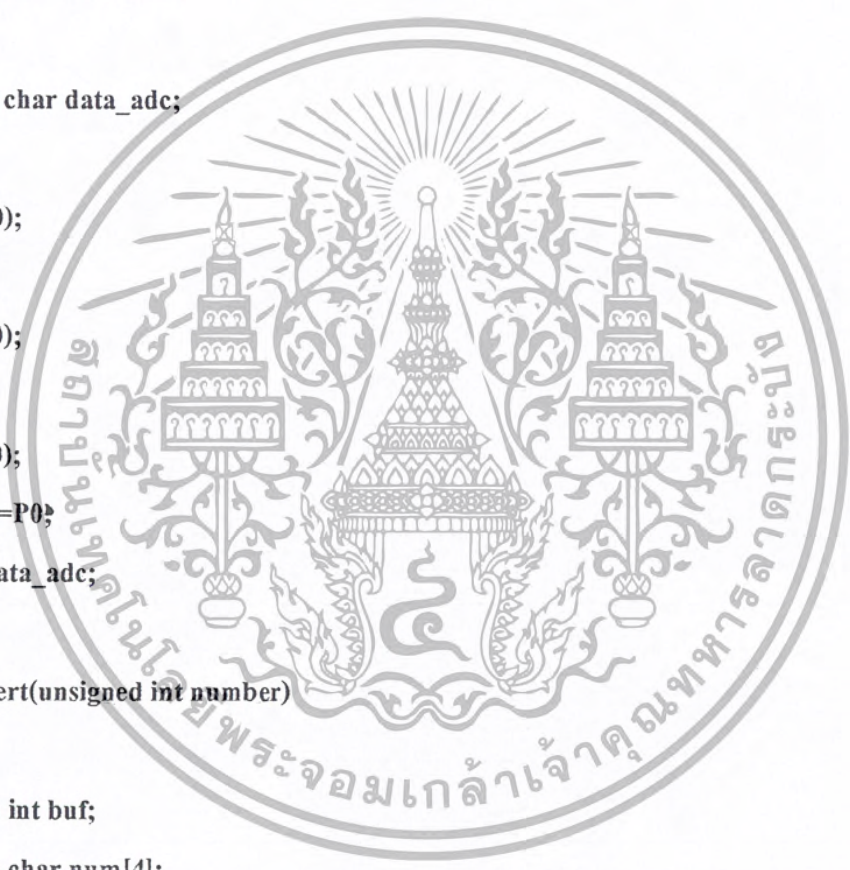
void convert(unsigned int number)

```

```

{
    unsigned int buf;
    unsigned char num[4];
    num[0]=(number/1000)+0x30;
    buf=number%1000;
    num[1]=(buf/100)+0x30;
    buf%=100;
    num[2]=(buf/10)+0x30;
    num[3]=(buf%10)+0x30;
}

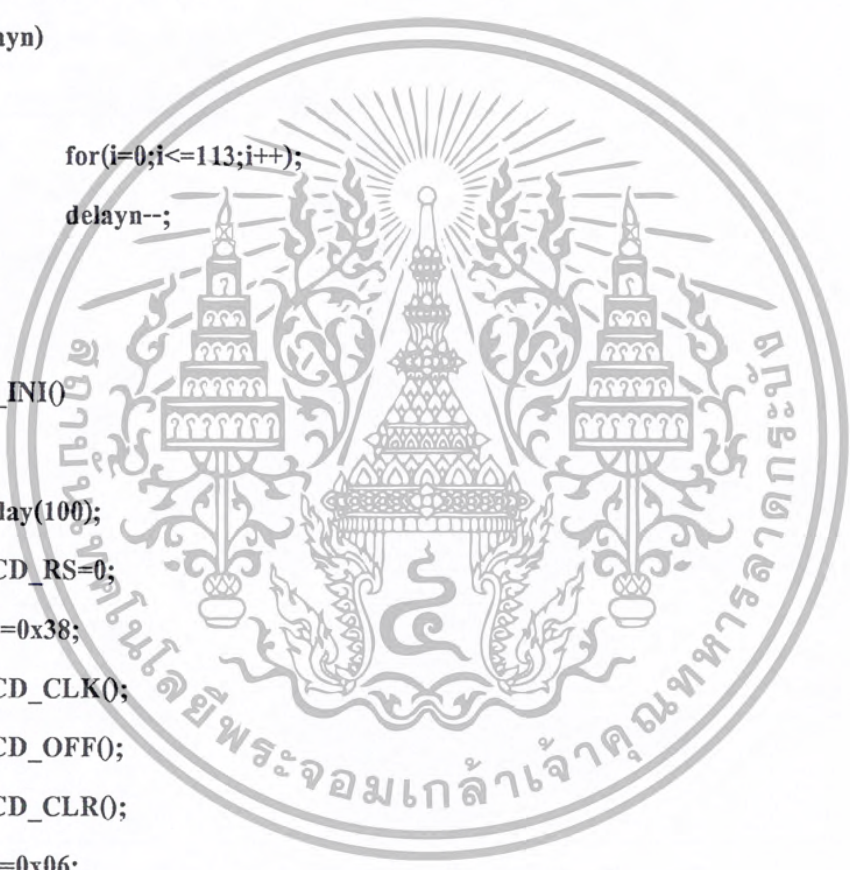
```



```

LCD_DATA(num);
LCD_DATA1("GUASS");
}
void delay(unsigned int delay) /*delay n ms*/
{
unsigned int i,delayn=delay;
while (delayn)
    {
        for(i=0;i<=113;i++);
        delayn--;
    }
}
void LCD_INIT()
{
    delay(100);
    LCD_RS=0;
    P1=0x38;
    LCD_CLK0;
    LCD_OFF0;
    LCD_CLR0;
    P1=0x06;
    LCD_CLK0;
    LCD_ON0;
    LCD_HOME0;
}
void LCD_ON()
{

```



```

LCD_RS=0;
P1=0x0C;
LCD_CLK0;
}
void LCD_CLK0
{
LCD_EN=1;
delay(10);
LCD_EN=0;
delay(10);
}
void LCD_CLR0
{
LCD_RS=0;
P1=0x01;
LCD_CLK0;
}
void LCD_HOME0
{
LCD_RS=0;
P1=0x02;
LCD_CLK0;
}
void LCD_OFF0
{

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LCD_RS=0;
P1=0x10;
LCD_CLK0;
}
void LCD_DATA1(unsigned char *data_send)
{
    unsigned int i,m;
    LCD_SETADDR(0x40);
    m=strlen(data_send);
    for(i=1;i<=m;i++){
        LCD_RS=1;
        P1=*data_send;
        data_send++;
        LCD_CLK0;
    }
}
void LCD_DATA(unsigned char *data_send)
{
    unsigned int i,m;
    LCD_SETADDR(0x00);
    m=strlen(data_send);
    for(i=1;i<=m;i++){
        if(i==9)
            LCD_SETADDR(0x40);
        LCD_RS=1;
        P1=*data_send;

```

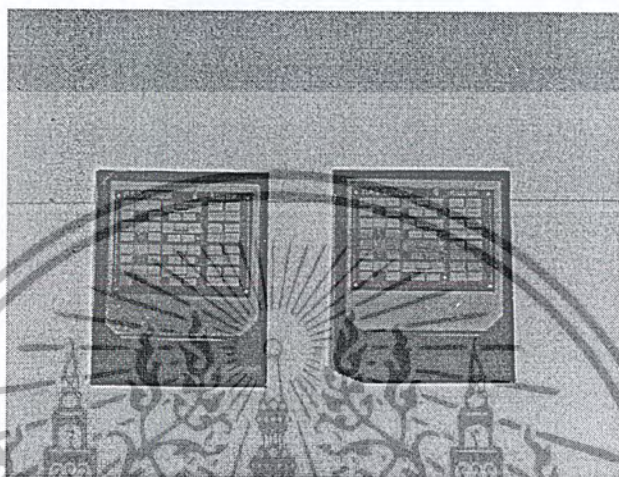


```
        data_send++;  
        LCD_CLK0;  
    }  
}  
  
void LCD_SETADDR(unsigned char addr)  
{  
    LCD_RS=0;  
    P1=addr|0x80;  
    LCD_CLK0;  
}
```



ภาคผนวก ฉ. รูปเครื่องมือในการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์

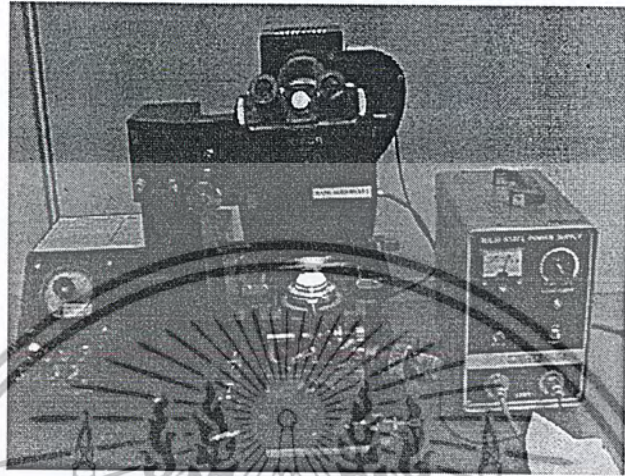
รูปเครื่องมือในการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์



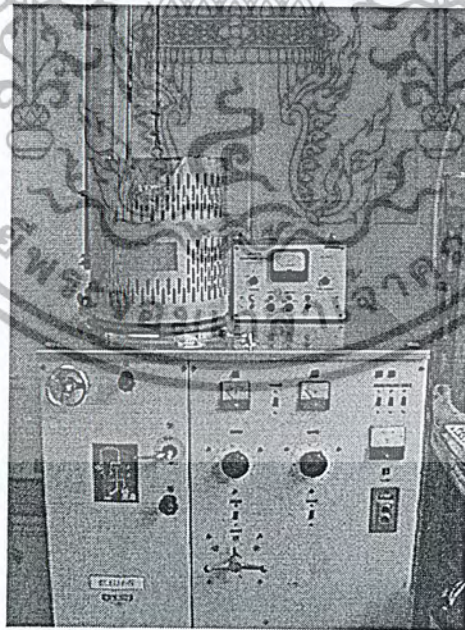
รูปที่ 3 ชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้ว



รูปที่ 4 แสดงเตาที่ใช้ในกระบวนการออกซิเดชัน

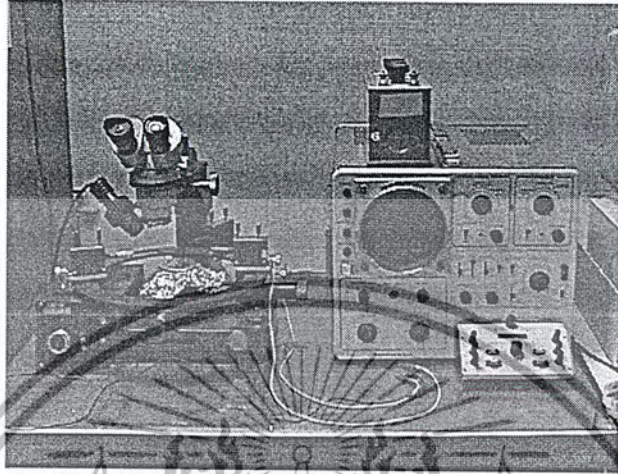


รูปที่ 5 เครื่องซอแนมาร์คและฉายแสง

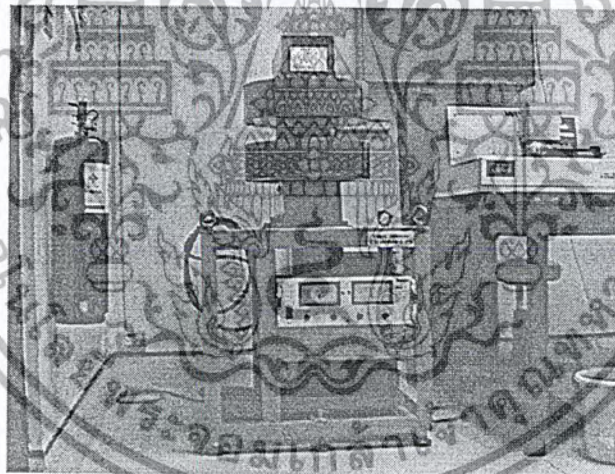


รูปที่ 6 เครื่อง Evaporator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 Curve Tester และ Probe



รูปที่ 8 เครื่องผลิตสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับเมกนีโตทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็ก การปฏิบัติงานการทดลองสามารถลู่วงไปได้ด้วยดี จากการได้รับคำแนะนำ คำปรึกษา ความรู้ทางทฤษฎีวิธีการในการปฏิบัติงาน คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ วิธีการแก้ไขปัญหา โดย ผศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล (อาจารย์ที่ปรึกษา) นายโสภณ พรหมชัย (นักศึกษาปริญญาโท) รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ได้ให้คำปรึกษาต่างๆ ที่เป็นความรู้เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงาน คณะอาจารย์ทุกท่านที่ถ่ายทอดความรู้ทางวิชาการ คณะผู้จัดทำจึงใคร่ขอกราบพระคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วย



(นายจิรภาค สิริพงษ์)

(นายสิทธิชัย กิ่งคำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. ผศ.ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรภูด “อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , พฤษภาคม 2544
2. รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์” แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , สิงหาคม 2544
3. รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช “Semiconductor Devices” แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , มิถุนายน 2545
4. Julian W. Gardner , “Microsensors” , McGraw-Hill Book Company , INC , 1994
5. Henry P.Bates and Radivoje S.Popovic , “Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor , Vol 74 , No 8” , August 1986
6. ผศ. วีรวัฒน์ ประกอบผล “การพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยภาษาซี” สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. , พฤษภาคม 2545
7. www.TI.com

