

แมกนีโตทรานซิสเตอร์

Magnetotransistors



โดย
นายถาวร หงษ์อินทร์
นายนาวิน นิลชาติ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 46278
วัน, เดือน, ปี 21 ส.ค. 2546

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แมกนีโตทรานซิสเตอร์
Magnetotransistors



ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แมกนีโตทรานซิสเตอร์

Magnetotransistors

นายถาวร หงษ์อินทร์ รหัสนักศึกษา 42515727

นายนาวิน นิลชาติ รหัสนักศึกษา 42515731

โครงการได้รับการตรวจสอบแล้วพร้อมที่จะทำการสอบได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2544

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แมกนีโตทรานซิสเตอร์

Magnetotransistors

ผู้จัดทำ

นายถาวร หงษ์อินทร์ รหัสนักศึกษา 42515727

นายนาวิน นิลชาติ รหัสนักศึกษา 42515731



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แมกนีโตทรานซิสเตอร์

นายถาวร หงษ์อินทร์

นายนาวิน นิลชาติ

ผศ. ดร.เคิมพงษ์ เพ็ชรกุล(อาจารย์ที่ปรึกษา)

ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยในปริญญาโทครั้งนี้ จะศึกษาเกี่ยวกับการสร้าง และการวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติ ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตามขวาง ซึ่งใช้ตรวจสอบสัญญาณ แม่เหล็ก โดยจะมีโครงสร้างพื้นฐานแบบเดียวกับ การสร้างซีมอส ในการสร้างจะต้องมีการวัดความลึกของหลุมพี ซึ่งมีค่าประมาณ 4 ไมครอน เมื่อสร้างเสร็จแล้วทำการทดสอบคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น การทดสอบแมกนีโตทรานซิสเตอร์โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ ทดสอบผลของกระแสที่เปลี่ยนไปเมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากนั้นก็ทำการวิเคราะห์ผลของความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ได้หลังจากการให้สนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะอาศัยทฤษฎีการหักเหของกระแสตาม กฎของแรงลอเรนซ์ ทำให้กระแสถูกหักเหทิศทางไปโดยที่ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุดที่ 1.1 T^{-1} ที่เงื่อนไขการให้ไบอัสกระแสเบส 0.8 mA และความยาวเบสที่ 40 um ($L=40 \text{ um}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Magnetotransistors

Thawon Hong-in

Nawin Ninlachat

Assist.Prof Dr.Toempong Phetchakul

(Advisor)

Education year 2001

Abstract

The purpose of this thesis is to study, fabricate and analyse properties of lateral magnetotransistors that it used to sense magnetic field. The basic structure of lateral magnetotransistors are fabricate based on CMOS technology and this experiment was carried out to study on measured p-well depth (The p-well diffusion depth is 4 μm), tested the characteristic of P-N junction and DC biasing by using constant current circuit, observed the effect of current deflection when magnetic field presense and analysed relative sensitivity because the lateral magnetotransistors that depend on the lateral flow of carriers for magnetic response, the Lorentz force acts on flowing carriers, causing deflection. The magnitude of maximum relative sensitivity of 1.1 T^{-1} by the choice of bias condition at base current of 0.8 mA and base length of 40 μm ($L= 40 \mu\text{m}$).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ (Introduction)	1-4
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.2 ขอบเขตของโครงการ	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการนี้	3
บทที่ 2 ทฤษฎีสำหรับการทำงานของเมกนีโตทรานซิสเตอร์	5-26
2.1 การไหลของกระแสในสารกึ่งตัวนำ	5
2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อ พี-เอ็น	6
2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	14
2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)	17
2.5 โครงสร้างของเมกนีโตทรานซิสเตอร์ และ การทำงาน	19
2.6 กลไกของทิศทางการหักเหของอิเล็กตรอน	22
2.7 ความไวในการตรวจสอบสัญญาณแม่เหล็ก	25
บทที่ 3 ทฤษฎีของกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	27-37
3.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)	27
3.2 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photo lithography)	31
3.3 กระบวนการแพร่สารเจือ (Diffusion process)	33
3.4 กระบวนการเมทัลไลเซชันด้วย การทำอีวาโปเลชัน	35
บทที่ 4 การออกแบบโครงสร้างเมกนีโตทรานซิสเตอร์	38-46
บทที่ 5 ขั้นตอนการสร้างเมกนีโตทรานซิสเตอร์ด้วยเทคโนโลยี ซีมอส	47-58
บทที่ 6 การวัดคุณสมบัติของเมกนีโตทรานซิสเตอร์	59-86
6.1 วัดความลึก ของ P-well	59
6.2 วัดคุณสมบัติของรอยต่อ P-N ของ เมกนีโตทรานซิสเตอร์	59
6.3 ผลการวัดการไบอัสไฟฟ้ากระแสตรง	65
6.4 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก และ	72
ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก	
6.4.1 ผลของความไวในการตรวจจับสัญญาณแม่เหล็ก	84
บทที่ 7 สรุปผล	87-88
ภาคผนวก ก	89-112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข	113-116
ภาคผนวก ค	117-120
ภาคผนวก ง	121-122
ภาคผนวก จ	123-134
กิตติกรรมประกาศ	135
หนังสืออ้างอิง	136



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 a) แสดงภาพ โครงสร้างตัดขวางของแมกนีโตทรานซิสเตอร์	2
b) แสดงภาพ โครงสร้างด้านบนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์	
รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดกระแสครีฟท์ ของอิเล็กตรอนและ โฮลในสารกึ่งตัวนำ	5
รูปที่ 2.2 แสดง (ก) การกระจายของสนามไฟฟ้า และความหนาแน่นของพาหะ (ข) ทิศทางของกระแสครีฟท์ และกระแสการแพร่ของอิเล็กตรอนและ โฮล	6
รูปที่ 2.3 แสดงรอยต่อพี-เอ็น ในสภาวะสมดุลย์ (Equilibrium $V_A = 0$)	7
รูปที่ 2.4 แสดงรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับไบอัสตรง ($V_A > 0$)	8
รูปที่ 2.5 แสดงรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับ ($V_A < 0$)	9
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	10
รูปที่ 2.7 แสดงการเกิดพาหะและการรวมตัวของพาหะ โดยระดับพลังงาน Deep level ขณะไบอัสตรง	11
รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดพาหะและการรวมตัวของพาหะ โดยระดับพลังงาน Deep level ขณะไบอัสกลับ	12
รูปที่ 2.9 แสดงการเกิดการพังทลายแบบอะวาลานซ์ (Avalance breakdown)	13
รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดการพังทลายแบบซีเนอร์ (Zener breakdown)	14
รูปที่ 2.11 แสดง โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เอ็น-พี-เอ็น ไบอัสให้ทำงานในฟอร์เวิร์ดแอกทีฟโหมด	15
รูปที่ 2.12 แสดงการให้ไบอัสไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ในฟอร์เวิร์ดแอกทีฟโหมด	16
รูปที่ 2.13 แสดงทิศทางของกระแสและทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนเมื่อ ไบอัส แบบฟอร์เวิร์ดแอกทีฟโหมด	17
รูปที่ 2.14 แสดงการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ ในสารกึ่งตัวนำหน้าทีจากรูป โฮลพาหะส่วนมาก	18
รูปที่ 2.15 ภาพตัดขวางของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ n-p-n ที่ใช้ในการทดลอง	19
รูปที่ 2.16 ภาพตัดขวางส่วนของp-well ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์	21
รูปที่ 3.1 แสดงอัตราการเกิดของชั้นชิลิกอน ไดออกไซด์ ของการออกซิเดชันระนาบ (100) และ(111)	28
รูปที่ 3.2 ภาพแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ทำกระบวนการ ออกซิเดชันแบบแห้ง	29
รูปที่ 3.3 แสดงอุปกรณ์ระบบ ใช้น้ำ ของการออกซิเดชันแบบชื้น	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 แสดงเตาที่ใช้ในกระบวนการทำออกซิเดชัน	30
รูปที่ 3.5 แสดงกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	32
รูปที่ 3.6 แสดงแผนผังขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	33
รูปที่ 3.7 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการแพร่สารเจือชนิดพี	34
รูปที่ 3.8 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการแพร่สารเจือชนิดเอ็น	35
รูปที่ 3.9 แสดงหลอดสูญญากาศที่ใช้ในกระบวนการเคลือบโลหะในสูญญากาศ	36
รูปที่ 3.10 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการเคลือบโลหะในสูญญากาศ	37
รูปที่ 4.1 แสดง n-p-n แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดตามขวางใน CMOS เทคโนโลยี	38
รูปที่ 4.2 แสดง n-p-n แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดตามขวางแบบมีไซด์เวลด	39
ใน CMOS เทคโนโลยี	
รูปที่ 4.3 แสดง n-p-n แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดตามขวางแบบมีชั้นอิพิทาคี	40
ในไบโพลาร์เทคโนโลยี	
รูปที่ 4.4 แสดง n-p-n แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดตามขวางแบบ	41
ไม่มีชั้นอิพิทาคีในไบโพลาร์เทคโนโลยี	
รูปที่ 4.5 แสดง n-p-n แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดตามขวางแบบไซด์เวลดเดียวใน	42
CMOS เทคโนโลยี	
รูปที่ 4.6 แสดง n-p-n แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดตามขวางแบบไซด์เวลดเดียว	43
แบบสมมาตรใน CMOS เทคโนโลยี	
รูปที่ 4.7 แสดง n-p-n แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดตามขวางแบบสมมาตรใน	44
CMOS เทคโนโลยี	
รูปที่ 4.8 แสดงภาพตัดขวางของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ออกแบบเพื่อทดลอง	45
รูปที่ 4.9 แสดงภาพด้านบนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีความยาว L และกว้าง W	45
รูปที่ 4.10 แสดงแผนภาพการวางตั้งอุปกรณ์ในการสร้างลงบนแผ่นซิลิกอน	46
รูปที่ 4.11 แสดงกล่องใส่กระจกมาส์กหลังกระบวนการออกแบบที่พร้อมใช้งาน	46
รูปที่ 5.1 แสดงแผ่นซิลิกอนที่สร้างออกไซด์แล้ว	48
รูปที่ 5.2 แสดงการถ่ายภาพมาร์กเพื่อสกัดชั้นออกไซด์โดยเคลือบน้ำยาไวแสงแล้ว	49
รูปที่ 5.3 แสดงแผ่นซิลิกอนหลังจากสกัดชั้นออกไซด์ออกแล้วทำการแพร่โบรอนเข้าไป	50
รูปที่ 5.4 แสดงหลังจากทำการแพร่สารเจือและทำการขัดถูแล้ว	50
รูปที่ 5.5 แสดงโฟโตลิโทกราฟี มาร์กที่ 2 เพื่อสกัดชั้นออกไซด์ออก	51
รูปที่ 5.6 แสดงการสกัดชั้นออกไซด์ออกแล้วเพื่อทำการแพร่สารเจือต่อไป	51
รูปที่ 5.7 แสดงการเคลือบสารเจือ โดยใช้โบรอนเหลว	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.8 แสดงแผ่นซีลิกอนหลังจากจับลึกลงเป็น P ⁺	53
รูปที่ 5.9 แสดงเคลือบฟิล์มโดยสกัดชั้นฟิล์มออกตรงบริเวณที่จะสร้างเป็นขั้ว N ⁺	53
รูปที่ 5.10 แสดงการสกัดชั้นออกไซด์ออกแล้ว	54
รูปที่ 5.11 แสดงการเคลือบสารเจือฟอสฟอรัสเหลว	54
รูปที่ 5.12 แสดงหลังทำการจับลึกลงฟอสฟอรัสเหลวที่อุณหภูมิ 1100 °C เกิดเป็นขั้ว N ⁺	55
รูปที่ 5.13 แสดงการเปิดมาร์กคอนเทคโดยเคลือบน้ำยาไวแสง	55
รูปที่ 5.14 แสดงการสกัดชั้นออกไซด์ออกแล้วเพื่อทำการเคลือบอลูมิเนียมต่อไป	56
รูปที่ 5.15 แสดงการเคลือบด้วยอลูมิเนียมด้วยวิธีการอีวาโปเลท	56
รูปที่ 5.16 แสดงการสกัดชั้นอลูมิเนียมทำเป็นขั้วต่อ	57
รูปที่ 5.17 แสดงรูปชิ้นงาน แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตามขวางที่สร้างขึ้น	58
รูปที่ 6.1 แสดงกราฟผลการวัดระดับความลึกของ P-Well	59
รูปที่ 6.2 แสดงโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์สำหรับวัดรอยต่อ	60
รูปที่ 6.3 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-2	61
รูปที่ 6.4 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-3	61
รูปที่ 6.5 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-4	61
รูปที่ 6.6 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-5	62
รูปที่ 6.7 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 2-3	62
รูปที่ 6.8 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 2-4	62
รูปที่ 6.9 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 2-5	63
รูปที่ 6.10 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 3-4	63
รูปที่ 6.11 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 3-5	63
รูปที่ 6.12 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 4-5	64
รูปที่ 6.13 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 4-5 ที่มีกระแสรั่วมากเกินไป	64
รูปที่ 6.14 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-3 ที่เป็นรอยต่อพีเอ็นแทน	65
รูปที่ 6.15 แสดงวงจรการให้ไบอัสทรานซิสเตอร์แบบฟอร์เวิร์ดแอกทีฟโหมด ควบคุมกระแสด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่	65
รูปที่ 6.16 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์ กับกระแสเอมิเตอร์ที่ความกว้างเบส เท่ากับ 10 ไมโครเมตร	66
รูปที่ 6.17 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์ กับกระแสฐานรองที่ความกว้างเบส เท่ากับ 10 ไมโครเมตร	67
รูปที่ 6.18 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	กับกระแสมิตเตอร์ที่ความกว้างเบส เท่ากับ 20 ไมโครเมตร	
รูปที่ 6.19	กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์ กับกระแสฐานรองที่ความกว้างเบส เท่ากับ 20 ไมโครเมตร	69
รูปที่ 6.20	กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์ กับกระแสมิตเตอร์ที่ความกว้างเบส เท่ากับ 40 ไมโครเมตร	70
รูปที่ 6.21	กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์ กับกระแสฐานรองที่ความกว้างเบส เท่ากับ 40 ไมโครเมตร	71
รูปที่ 6.22	แสดงการไบอัสพร้อมทั้งมีสนามแม่เหล็ก B ตัดผ่านระนาบในลักษณะขวาง	72
รูปที่ 6.23	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 10 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	73
รูปที่ 6.24	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 10 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	74
รูปที่ 6.25	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 10 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	75
รูปที่ 6.26	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 10 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	76
รูปที่ 6.27	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 20 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	77
รูปที่ 6.28	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 20 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	78
รูปที่ 6.29	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 20 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	79
รูปที่ 6.30	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 20 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

50 มิลลิเทสลา	
รูปที่ 6.31 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 40 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	81
รูปที่ 6.32 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 40 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	82
รูปที่ 6.33 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 40 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	83
รูปที่ 6.34 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 40 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	84
รูปที่ 6.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการผลิตของ กระแสคอลเลคเตอร์ ต่อ สัญญาณแม่เหล็ก	85
รูปที่ 6.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความไวในการตรวจสอบสัญญาณแม่เหล็ก ภาคผนวก	86
รูปที่ 1 แสดงภาพกล่องป้องกันสัญญาณรบกวน	113
รูปที่ 2 แสดงชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้ว	114
รูปที่ 3 แสดงแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับเพื่อความสะดวกในการต่อขาภายนอก	114
รูปที่ 4 แผ่นวงจรที่ใช้ต่อขา LMT	115
รูปที่ 5 แสดงภาพกล่องวงจรควบคุมกระแสที่	115
รูปที่ 6 แสดงภาพกล่องต่อวงจร และป้องกันสัญญาณรบกวน	116
รูปที่ 7 แสดงการติดตั้งเพื่อการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก	116
รูปที่ 8 แสดงวงจรสมมูลและสัญลักษณ์ IC ควบคุมกระแส	117
รูปที่ 9 แสดงวงจรทดสอบ IC ควบคุมกระแส	117
รูปที่ 10 แสดงการต่อวงจรควบคุมกระแสเพื่อทดสอบการไบอัสกลับ n-p-n ทรานซิสเตอร์	118
รูปที่ 11 แสดงภาพสัญลักษณ์ต่อวงจร ไบอัสให้กับเม็กนีโตทรานซิสเตอร์	119
รูปที่ 12 แสดงภาพการต่อวงจรไบอัสให้กับเม็กนีโตทรานซิสเตอร์	119
รูปที่ 13 แสดงภาพการติดตั้งกับเครื่องกำเนิดสัญญาณแม่เหล็ก	120
รูปที่ 14 แสดงภาพมิเตอร์ที่แสดงผลการวัด	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

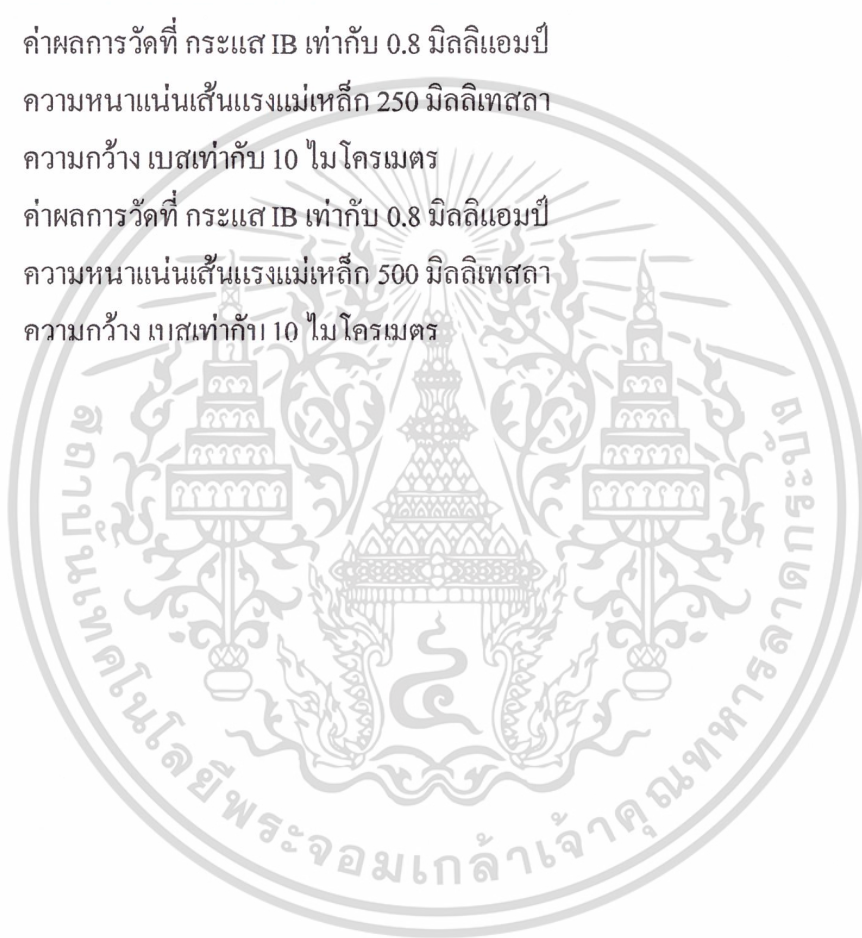
ตารางที่ 1	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	89
ตารางที่ 2	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	90
ตารางที่ 3	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	91
ตารางที่ 4	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	92
ตารางที่ 5	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 20 ไมโครเมตร	93
ตารางที่ 6	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 20 ไมโครเมตร	94
ตารางที่ 7	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 20 ไมโครเมตร	95
ตารางที่ 8	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 20 ไมโครเมตร	96
ตารางที่ 9	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 40 ไมโครเมตร	97
ตารางที่ 10	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50มิลลิตีเอสตา	
	ความกว้าง เบสเท่ากับ 40 ไมโครเมตร	
ตารางที่ 11	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์	99
	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50มิลลิตีเอสตา	
	ความกว้าง เบสเท่ากับ 40 ไมโครเมตร	
ตารางที่ 12	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์	100
	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50มิลลิตีเอสตา	
	ความกว้าง เบสเท่ากับ 40 ไมโครเมตร	
ตารางที่ 13	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์	101
	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 150 มิลลิตีเอสตา	
	ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	
ตารางที่ 14	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์	102
	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 250 มิลลิตีเอสตา	
	ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	
ตารางที่ 15	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์	103
	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 500 มิลลิตีเอสตา	
	ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	
ตารางที่ 16	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์	104
	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 150 มิลลิตีเอสตา	
	ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	
ตารางที่ 17	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์	105
	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 250 มิลลิตีเอสตา	
	ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	
ตารางที่ 18	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์	106
	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 500 มิลลิตีเอสตา	
	ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	
ตารางที่ 19	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์	107
	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 150มิลลิตีเอสตา	
	ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	
ตารางที่ 20	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์	108
	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 250มิลลิตีเอสตา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 21	ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 500 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	109
ตารางที่ 22	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 150 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	110
ตารางที่ 23	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 250 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	111
ตารางที่ 24	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 500 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	112



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

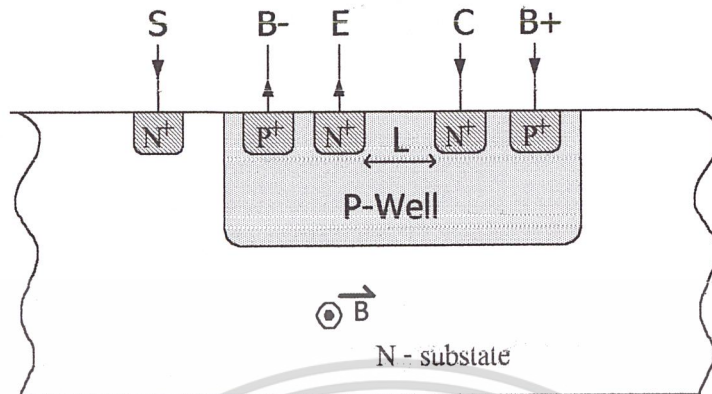
ในการตรวจหาสนามแม่เหล็กนั้นจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานของสัญญาณแม่เหล็กให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เพราะว่าปริมาณทางไฟฟ้าเป็นปริมาณที่สามารถนำมาแสดงผลให้มนุษย์ได้เห็นและเข้าใจได้ง่ายที่สุด เนื่องจากการได้มีการคิดประดิษฐ์ อุปกรณ์ที่เปลี่ยนปริมาณทางไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณที่มนุษย์มองเห็นด้วยตาและเข้าใจได้กันมากมายอยู่แล้ว สนามแม่เหล็กก็เป็นสัญญาณในอีกรูปแบบหนึ่ง การที่เราจะทราบปริมาณของสนามแม่เหล็กแล้วนำมาแสดงผลนั้น จำเป็นที่จะต้องทำให้สัญญาณทางแม่เหล็ก กระทบกับอุปกรณ์บางชนิดแล้วอุปกรณ์ชนิดนั้นก็เปลี่ยนรูปพลังงานแม่เหล็กออกมาเป็นพลังงานในรูปของกระแสหรือแรงดัน ก็เพราะว่าจะได้ทำการตรวจสอบปริมาณและแสดงผลได้ง่ายกว่า จึงได้จัดทำปริยญาณิพนธ์นี้ขึ้น และอีกประการหนึ่งเป็นการศึกษาถึงกระบวนการและวิธีการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เพื่อใช้งานเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ด้วยเทคโนโลยีและกระบวนการสร้างแบบซีมอสทรานซิสเตอร์ (CMOS Transistor)

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เปลี่ยนปริมาณทางแม่เหล็ก (ความเข้ม , ความหนาแน่น) เป็นปริมาณทางไฟฟ้า (แรงดัน , กระแส) มีหลายชนิดด้วยกันเช่น ไดโอดแม่เหล็ก(Magnetic diode) อุปกรณ์ฮอลล์(Hall devices) เป็นต้น แต่อุปกรณ์ฮอลล์ เป็นอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟใช้ปรากฏการณ์ การผลึกประจุพาหะ แต่แมกนีโตทรานซิสเตอร์ ที่สร้างขึ้นนี้เป็นอุปกรณ์ประเภทแอคทีฟจึงทำให้มีแรงดันหรือกระแสที่เอาต์พุตของตัวอุปกรณ์ที่มากกว่าอุปกรณ์ฮอลล์ , มีความไวในการตรวจสอบที่สูงกว่า (High sensitivity) และมีการตอบสนองแบบเป็นเชิงเส้น (Linear response)

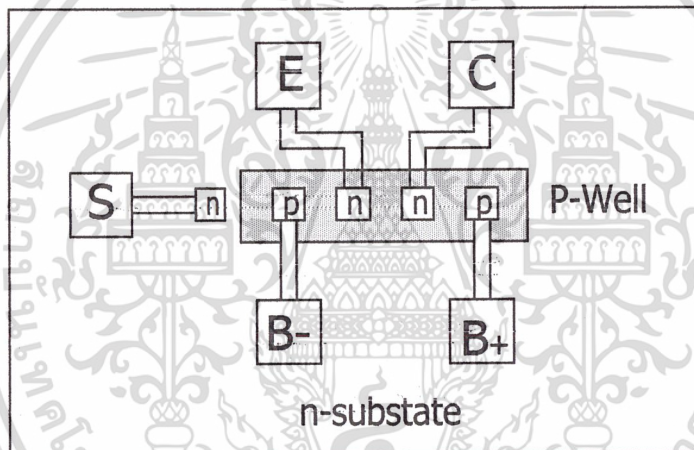
การแบ่งรูปแบบของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ได้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวขวาง (Lateral magnetotransistor) และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวตั้ง (Vertical magnetotransistor) สำหรับในปริยญาณิพนธ์นี้จะเป็นทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวขวางซึ่งในเทคโนโลยีการสร้างเดียวกันแบบ ซีมอส(CMOS) และทำให้กระแสจากประจุพาหะไหลในชั้นสารกึ่งตัวนำได้ในแนวขวาง ในส่วนของการทดลองในปริยญาณิพนธ์นี้ได้ทำการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ขึ้นมาตามโครงสร้างที่ได้มีการออกแบบไว้แล้ว เมื่อสร้างเรียบร้อยแล้วก็ได้ทำการวัดคุณสมบัติเบื้องต้น เช่น คุณสมบัติของรอยต่อระหว่างแต่ละรอยต่อ ทั้งยังวัดความลึกของชั้นพีเวลขณะทำการสร้างด้วย จากนั้นก็นำไปตัดแบ่งตัวแมกนีโตทรานซิสเตอร์ออกเป็นชิ้นๆเพื่อต่อสายสำหรับเป็นการนำไปใช้ในการวัดทดลอง ในการวัดทดลองได้มีการออกแบบวงจรด้านคุมกระแสและวัดการไบอัสกระแสตรง แล้วจึงทดสอบกับสนามแม่เหล็กแล้วนำค่าที่ได้มาทำการวิเคราะห์และสรุปผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้มีโครงสร้างภาพตัดขวางและภาพด้านบน ดังในรูปที่ 1.1



a).



b).

รูปที่ 1.1 a) แสดงภาพโครงสร้างตัดขวางของแมกนีโตทรานซิสเตอร์
b) แสดงภาพโครงสร้างด้านบนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

1.1 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1.1.1 เพื่อทำการศึกษาถึงกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแล้วมาทำการประยุกต์สำหรับสร้าง เป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์

1.1.2 ศึกษาคุณสมบัติในการทำงานและการตรวจจับสัญญาณแม่เหล็กของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

1.1.3 สามารถออกแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในการตรวจสอบสัญญาณแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.4 สามารถทำการวิเคราะห์ถึงกระบวนการทำงาน การไหลของกระแสและผลของแม่เหล็กที่ทำให้กระแสเกิดการหักเหทิศทางไป

1.1.5 สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองแล้วนำไปประยุกต์ใช้งานได้

1.2 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1.2.1 ออกแบบโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์

ทำการออกแบบ โดยจะมีโครงสร้างคั่งรูปที่ 1.1 ซึ่ง ขั้ว เบส และคอลเลกเตอร์ ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์จะมีอัตราส่วนของความกว้างต่อความยาวที่แตกต่างกันไปในแต่ละตัวเพื่อทำการทดสอบบนแต่ละเงื่อนไขที่แตกต่างกัน

1.2.2 ทำการสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์

ในการสร้างจะใช้กระบวนการสร้างแบบเดียวกับการสร้างชิมอส ด้วยเทคนิคการเติมสารเจือแบบแพร่ (Diffusion) โดยใช้สารเจือชนิดแข็ง (Solid source) สำหรับแพร่ชั้นพีเวล (p-well) และใช้สารเจือชนิดเหลว (Liquid source) สำหรับการแพร่ สร้างเป็นขั้ว โดย ขั้วชนิดพี (p-type) โดยใช้โบรอน (Boron) และชนิดเอ็น (n-type) โดยใช้ฟอสฟอรัส (Phosphorus)

1.2.3 ทำการวัดคุณสมบัติของรอยต่อของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

เมื่อสร้างทรานซิสเตอร์แล้วจะทำการวัดคุณสมบัติของไฟฟ้าของรอยต่อต่าง ๆ และวัดความลึกของชั้นพีเวล เพื่อทดสอบความผิดพลาดในการสร้างและตรวจสอบว่าแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่สร้างขึ้นมาแล้ว จะสามารถนำไปทดลองต่อไปได้หรือไม่

1.2.4 ทำการทดลองให้ไบอัสสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง

เพื่อหาช่วงการทำงานที่เหมาะสม ด้วยวงจรไบอัสแบบควบคุมกระแสคงที่ โดยกำหนดให้แมกนีโตทรานซิสเตอร์ทำงานที่ช่วง I_c ประมาณ 0.1 – 1 mA

1.2.5 ทำการทดสอบกับสนามแม่เหล็ก

เมื่อได้จุดการทำงานที่เหมาะสมแล้วก็จะทำการนำไปทดสอบกับสนามแม่เหล็กขนาดประมาณ $5 \times 10^{-2} T$ - 0.5 T แล้วทำการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส I_c และทำการวิเคราะห์และสรุปผล

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากปริญญานิพนธ์

1.3.1 เข้าใจถึงทฤษฎีการทำงานของการไหลของกระแสและประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำ

1.3.2 เข้าใจถึงผลกระทบของสนามแม่เหล็กต่อการเดินทางของประจุพาหะในชั้นสารกึ่งตัวนำ

1.3.3 เข้าใจถึงกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3.4 เข้าใจถึงกระบวนการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ
- 1.3.5 ออกแบบการไบอัสที่เหมาะสมให้กับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้
- 1.3.6 เข้าใจถึงความสัมพันธ์ของกลไกทางไฟฟ้าและแม่เหล็กในสารกึ่งตัวนำได้
- 1.3.7 เข้าใจถึงผลการทดลองและทฤษฎีของแมกนีโตทรานซิสเตอร์
- 1.3.8 สามารถที่จะนำความรู้ไปประยุกต์ใช้งานได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีสำหรับการทำงานของแมกนีโตรีทรานซิสเตอร์

การอธิบายเกี่ยวกับการทำงานของแมกนีโตรีทรานซิสเตอร์จะมีทฤษฎีที่ใช้อธิบายประกอบไปด้วยทฤษฎีหลักๆดังต่อไปนี้

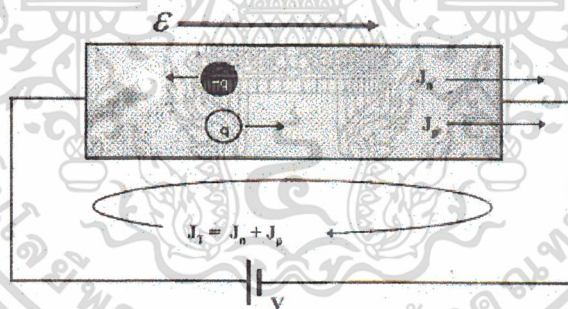
2.1 การไหลของกระแสในสารกึ่งตัวนำ

กระแสที่ไหลในสารกึ่งตัวนำจะมีอยู่ 2 แบบคือ

2.1.1 กระแสดริฟท์(Drift current)

ในสารกึ่งตัวนำซึ่งมีพาหะอยู่ 2 ชนิด คือ อิเล็กตรอนและโฮล เมื่อได้รับสนามไฟฟ้าจะเกิดมีแรงกระทำต่อพาหะทั้งสองและทำให้พาหะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วครีฟท์ โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางสนามไฟฟ้า แต่โฮลเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าการเคลื่อนที่ของพาหะทำให้เกิดมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น และกระแสพาหะทั้งสองมีทิศทางเดียวกัน กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “กระแสดริฟท์” ดังแสดงในรูปที่ 2.1

จะได้ว่า กระแสดริฟท์ของอิเล็กตรอน $J_n = nq\mu_n \epsilon$



รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดกระแสดริฟท์ ของอิเล็กตรอนและ โฮลในสารกึ่งตัวนำ

2.1.2.กระแสการแพร่(Diffusion current)

เป็นกระแสที่เกิดขึ้นได้เนื่องจากพาหะในสารกึ่งตัวนำมีการเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน โดยจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูง ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า การเคลื่อนที่ลักษณะนี้เรียกว่า “กระแสการแพร่”

ในทางปฏิบัติแล้วสารกึ่งตัวนำอาจได้รับสนามไฟฟ้าและมีการกระจายของพาหะไม่สม่ำเสมอได้ ในเวลาเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้นจึงมีกระแสดริฟท์และกระแสการแพร่ของอิเล็กตรอนและ โฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

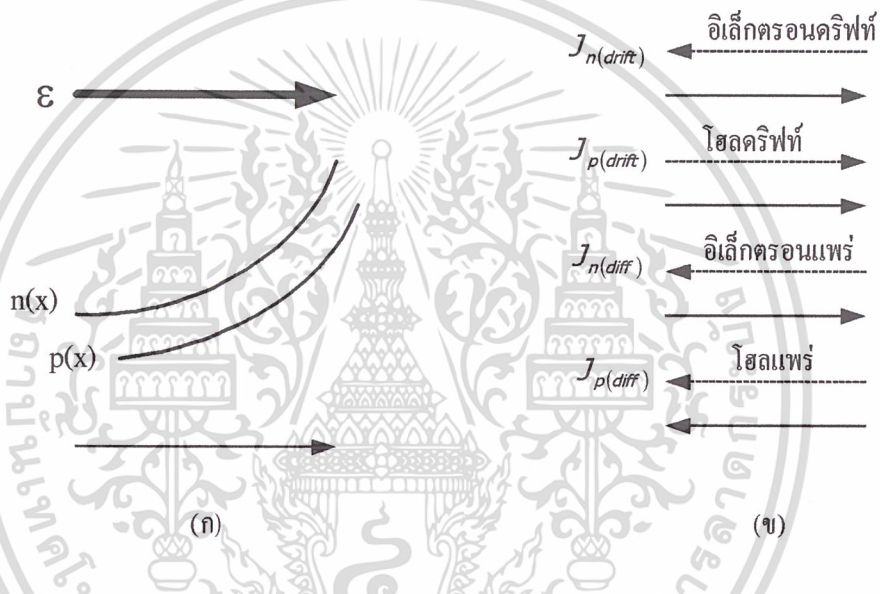
เกิดขึ้นพร้อมๆกันได้ กระแสรวมที่ไหลในสารกึ่งตัวนำจึงเป็นผลรวมของกระแสต่างๆเหล่านี้ดังแสดงในสมการ

$$J_n = nq \mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx} \tag{2.1}$$

$$J_p = pq \mu_p E + qD_p \frac{dp}{dx} \tag{2.2}$$

$$J_T = J_n + J_p \tag{2.3}$$

จากสมการการเกิดกระแสและทิศทางของกระแสในสารกึ่งตัวนำจะสังเกตได้ว่ากระแสการแพร่ของโฮล มีทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสขึ้นๆ

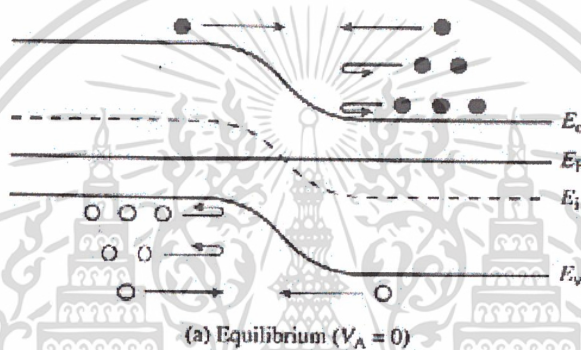


รูปที่ 2.2 แสดง (ก) การกระจายของสนามไฟฟ้า และความหนาแน่นของพาหะ (ข) ทิศทางของกระแสครีฟท์ และกระแสการแพร่ของอิเล็กตรอนและ โฮล

2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อ พี-เอ็น

เมื่อรอยต่อพี – เอ็น เกิดขึ้น จะเห็นว่าเนื่องจาก ด้านทั้งสองของรอยต่อมีความแตกต่างกันของความหนาแน่นของพาหะ ดังนั้นพาหะจากทางด้านซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่า จะแพร่ไปทางด้านที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า นั่นคือโฮลทางด้านพี (P_p) จะแพร่ข้ามรอยต่อเข้าไปยังด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านเอ็น (N_n) จะข้ามรอยต่อเข้ามาทางด้านพี การแพร่ของพาหะข้ามรอยต่อนี้ จะเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้ๆ รอยต่ออันดับแรก และดังนั้นอะตอมสารเจือผู้รับ (N_A) ทางด้านพีบริเวณรอยต่อจะกลายเป็นไอออนลบ (Negative ions) อะตอมสารเจือผู้ให้ (N_D) ทางด้านเอ็นบริเวณรอยต่อจะกลายเป็นไอออนบวก (Positive ions) ประจุไฟฟ้าของไอออนดังกล่าวนี้ จะทำให้เริ่มเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นบริเวณรอยต่อ ซึ่งเราเรียกว่า สนามไฟฟ้าภายใน สนามไฟฟ้า (Electric field) ที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยต่อต้านการเคลื่อนที่ของพาหะอิสระ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ของโฮลจากทางด้านพี และอิเล็กตรอนจากทางด้านเอ็น ไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ แต่อย่างไรก็ดี การข้ามรอยต่อของพาหะเหล่านี้ จะยังคงดำเนินอยู่ต่อไปกระทั่งสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นมีผลพอดีทำให้โฮลและอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ในสภาวะนี้จะไม่มีการแสของพาหะใดๆ ข้ามรอยต่อเลย ซึ่งเราเรียกว่าสภาวะนี้ว่า “ ภาวะสมดุล ” (Equilibrium) ที่บริเวณรอยต่อซึ่งมีสนามไฟฟ้าภายในเกิดขึ้น จะเป็นบริเวณซึ่งไม่มีพาหะอยู่เรียกว่า “ บริเวณปลดพาหะ “ (Depletion Region หรือ Space Charge Region หรือ Transition region) โดยทั่วไปมีความกว้างราว 1 ไมครอน เนื่องจากการที่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อพี – เอ็น ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างด้านพีและด้านเอ็น ซึ่งเราเรียกว่า “ ศักย์สัมผัส ” (Contact Potential : V_0) หรือ “ แรงดันภายใน ” (Built in Voltage : V_{bi})



รูปที่ 2.3 แสดงรอยต่อพี-เอ็น ในสภาวะสมดุล (Equilibrium $V_A = 0$)

2.2.1 รอยต่อพี-เอ็น ในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง

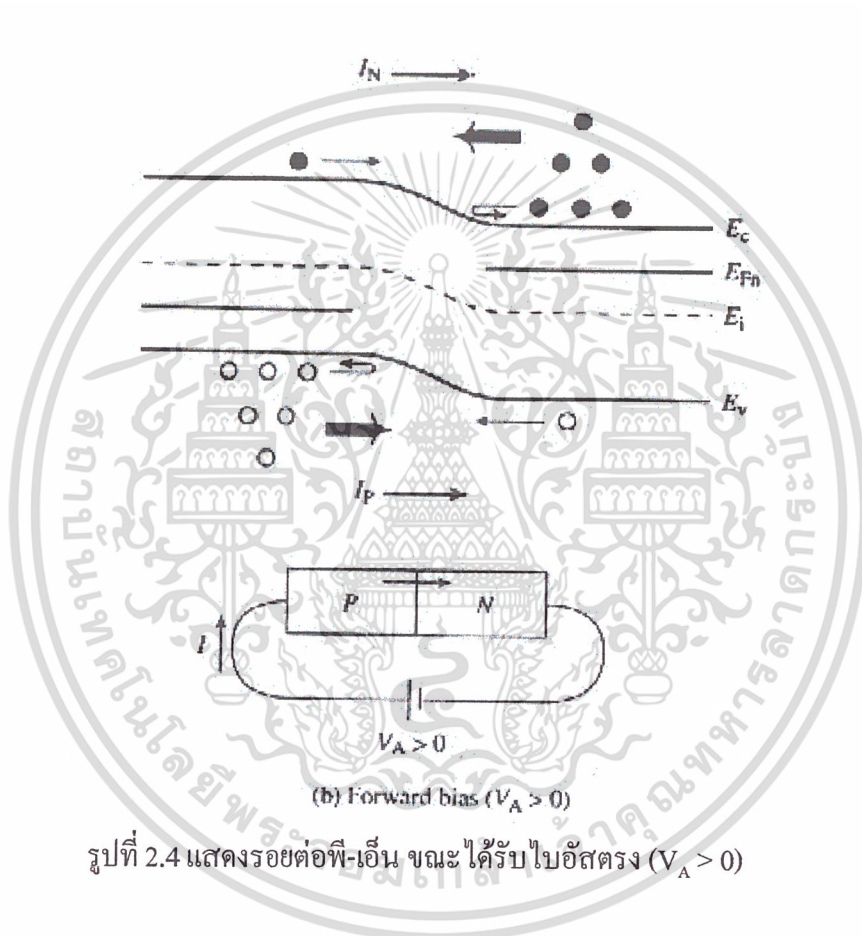
ในขณะภาวะสมดุลเมื่อไม่มีแรงดันไบอัสใดๆ ให้แก่รอยต่อ จะไม่มีกระแสไหลผ่านรอยต่อทั้งนี้เนื่องจากมีสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อซึ่งขัดขวางการแพร่ของพาหะ ในกรณีที่รอยต่อ พี-เอ็น ได้รับแรงดันไบอัสตรง กล่าวคือทางด้านพีมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 การต่อขั้วลบของแบตเตอรี่เข้าทางด้านเอ็นและต่อขั้วบวกเข้าทางด้านพี

โดยการพิจารณาว่า ความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นมีค่าน้อยมาก ดังนั้นแรงดันไบอัสตรงภายนอก V_A จากแบตเตอรี่ทั้งหมดจะไปปรากฏที่รอยต่อพี-เอ็น และอยู่ในลักษณะที่หักล้างหรือช่วยลดศักย์ค่าไฟฟ้าภายในรอยต่อพี – เอ็น ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อในขณะนี้คือ ($V_{bi} - V_A$) นั่นคือศักย์ค่าไฟฟ้าภายในรอยต่อจะมีค่าลดลง ดังนั้นอิเล็กตรอนจากทางด้านเอ็น และโฮลจากทางด้านพี ก็สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปยังด้านตรงข้ามได้โดยสะดวก รอยต่อพี-เอ็น ขณะนี้จึงทำตัวเสมือนเป็นตัวนำ ขอมให้กระแสไหลผ่านได้ดี กระแสดังกล่าวนี้จะถูกต้านก็เฉพาะ ความต้านทานอันเนื่องมาจากเนื้อสารกึ่งตัวนำเท่านั้น ซึ่งมีค่าน้อยมาก และความกว้างของบริเวณปลดพาหะในขณะนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะลดลง และแคบกว่าในกรณีที่ยังไม่ได้รับไบอัส การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และ โฮล ทำให้เกิดกระแสไหลขณะได้รับไบอัสตรง ดังสมการ

$$I = I_0 \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) \quad 2.4$$

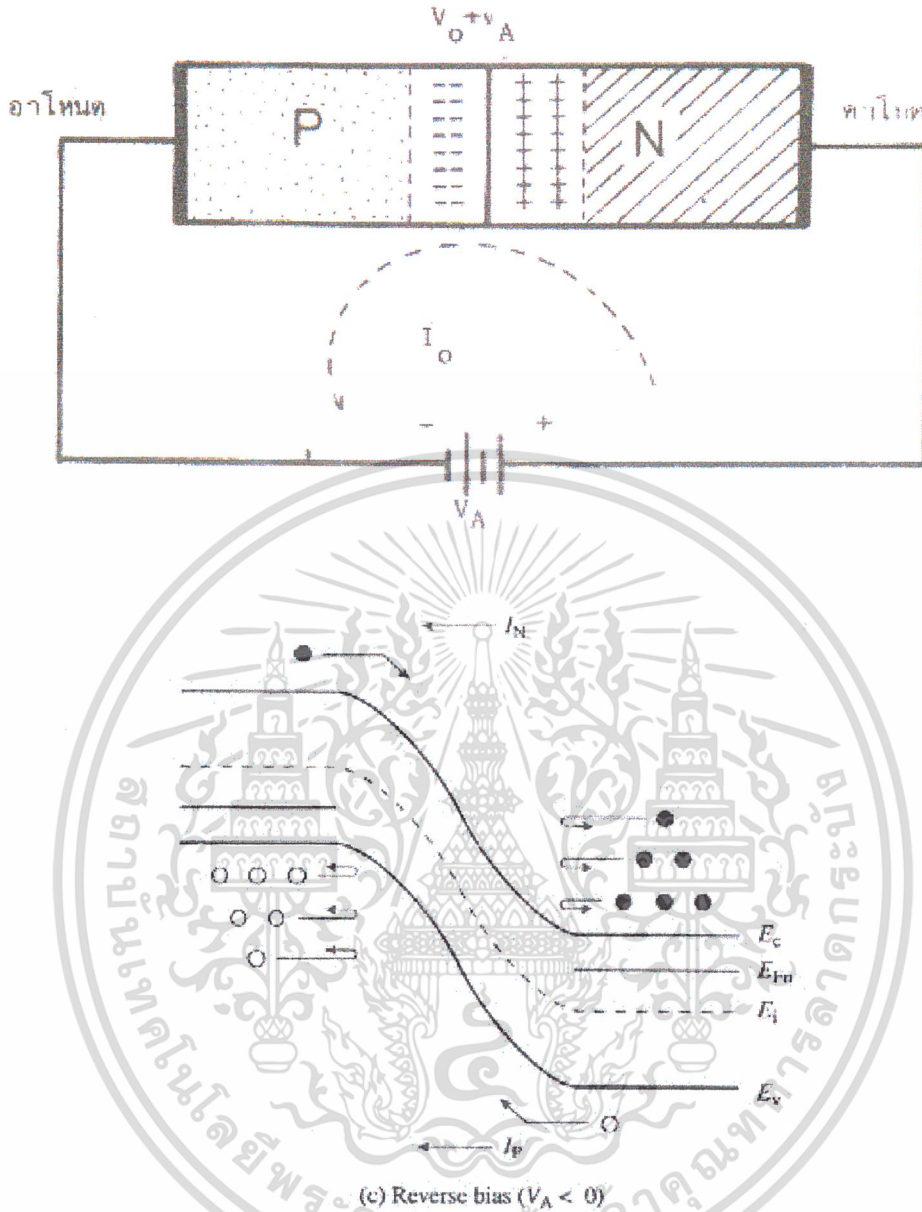


รูปที่ 2.4 แสดงรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับไบอัสตรง ($V_A > 0$)

2.2.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับ

ในตอนนี้เราจะมาพิจารณาสถานการณ์ที่รอยต่อพี-เอ็น ได้รับไบอัสย้อนกลับดังในรูปที่ 2.5 กล่าวคือทางด้านพีจะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับทางด้านเอ็น ดังนั้นถ้าหากให้แรงดันย้อนกลับแก่รอยต่อมีค่า V_A จะเห็นว่า แรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A จากภายนอกจะไปช่วยเพิ่มแรงดันภายในที่รอยต่อให้มีค่าสูงขึ้นจากเดิมดังนั้นแรงดันตกคร่อมรอยต่อในขณะนี้ก็คือ $(V_0 + V_A)$ นั่นคือศักดาไฟฟ้าภายในรอยต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้พาหะส่วนมากไม่มีโอกาสที่จะแพร่ข้ามรอยต่อได้ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะในขณะนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นและกว้างมากกว่าในกรณีที่ยังไม่ได้รับไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับ ($V_A < 0$)

กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อจะมีค่าน้อยมากซึ่งจะเป็นกระแสของพาหะส่วนน้อย เรียกว่า “กระแสรั่ว (Leakage current)” ซึ่งความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยใกล้ๆบริเวณปลอดพาหะจะมีจำนวนลดลงสามารถหาได้จากกฎของรอยต่อ คือ

$$P_n |_{t_n} = P_{no} \cdot e^{q \cdot V_A / K T} \tag{2.5}$$

$$n_p |_{t_p} = n_{po} \cdot e^{q \cdot V_A / K T} \tag{2.6}$$

พิจารณากระแสเมื่อได้รับไบอัสย้อนกลับที่อุณหภูมิห้อง ($T=300K^\circ$) จะได้ค่ากระแสมีค่าประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = I_0 \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) \quad 2.7$$

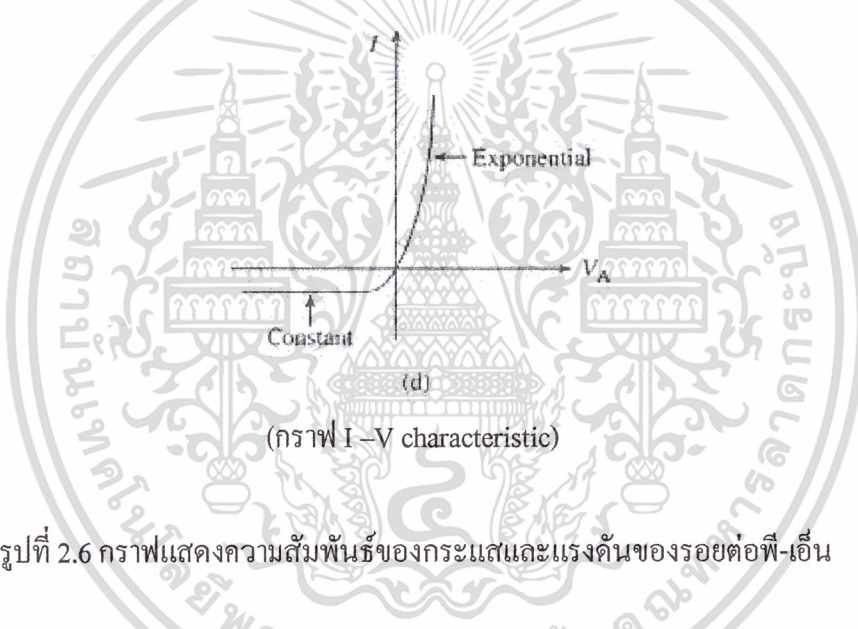
เทอม $\left(e^{qV_A/KT} \right)$ จะน้อยกว่าหนึ่งมาก ๆ จะได้

$$I = -I_0 \quad 2.8$$

จากกระแสที่ได้นั้นจะเห็นได้ว่า กระแส I_0 เป็นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าน้อยมาก ๆ และไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัส แต่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของรอยต่อเท่านั้นเอง

2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

จากสมการกระแสของไดโอดนั้นเมื่อทำการพิจารณาจากการให้ไบอัสทั้งสองแบบแล้วนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสแล้วจะได้กราฟดังนี้



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

จากกราฟพิจารณาที่ควอดแดรนต์ที่ 1 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสตรงไปจนถึงค่าๆหนึ่ง (ถึงค่าแรงดันภายใน ; Built in Voltage) จะทำให้เกิดกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากเป็นลักษณะการเพิ่มแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลนั่นเอง และพิจารณาที่ควอดแดรนต์ที่ 3 จะเห็นได้ว่าเมื่อป้อนไบอัสกลับจะเกิดมีกระแสรั่วขึ้นที่บริเวณรอยต่อแต่หากว่ามีค่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ถ้าป้อนไบอัสกลับจนถึงค่าแรงดันพังซึ่งจะเกิดมีกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย

2.2.4 กระแสรั่วที่รอยต่อพี-เอ็น

กระแสรั่วที่เกิดขึ้นที่รอยต่อพีเอ็น จะเกิดขึ้นขณะไบอัสกลับเท่านั้น ซึ่งกระแสรั่ว 2 ชนิดคือ

1. กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ I_0 โดยจะมีค่าประมาณ แสดงดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_O = A.q.n_i^2 \left[\frac{D_P}{L_P N_D} + \frac{D_N}{L_N N_A} \right] = A.q.n_i^2 \left[\frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_P}{\tau_P}} + \frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_N}{\tau_N}} \right] \quad 2.9$$

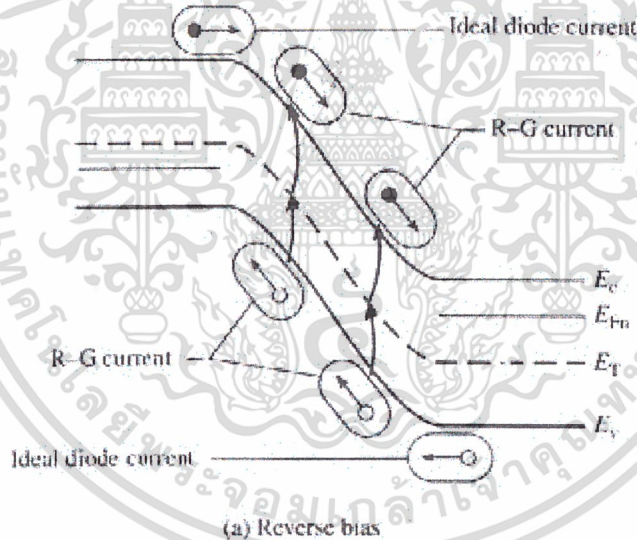
2. กระแสการเกิดและการรวมตัว (Generation-Recombination)

กระแสชนิดนี้เรียกกันย่อๆว่ากระแส G-R จะเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของผลึกของชิ้นสาร ซึ่งแบ่งได้เป็น

2.1. ชิ้นสารไม่บริสุทธิ์ (Metallic impurities)

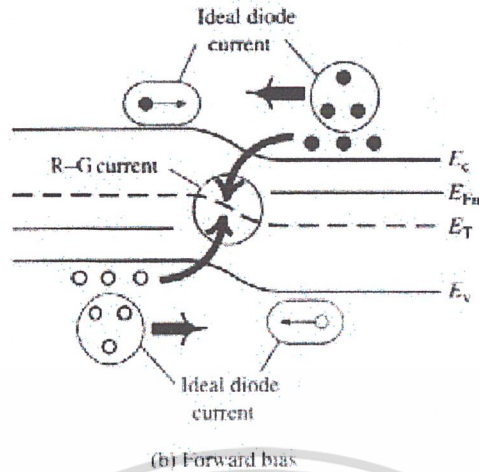
2.2. ผลึกสารที่บกพร่อง (Crystalline defects)

สาเหตุที่ทำให้ผลึกไม่สมบูรณ์ของทั้งสองชนิดนั้นจะเกิดมีระดับพลังงานที่เรียกว่าที่พักอิเล็กตรอน (Deep level) แสดงตัวเป็นศูนย์กลางการรวมตัว (Recombination-Center) เกิดขึ้นในช่องว่างตรงกลางของแถบพลังงาน โดยมันจะเป็นที่พักรของพาหะอิเล็กตรอน หรือ โฮล ในขณะที่มันเคลื่อนที่ระหว่างแถบวาเลนซ์ (Valance band) และแถบความนำทำให้เกิด “การเกิดของพาหะ” หรือ “การรวมพาหะ” (Combination) ได้



รูปที่ 2.7 แสดงการเกิดพาหะและการรวมตัวของพาหะ โดยระดับพลังงาน Deep level ขณะไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดพาหะและการรวมตัวของพาหะ โดยระดับพลังงาน

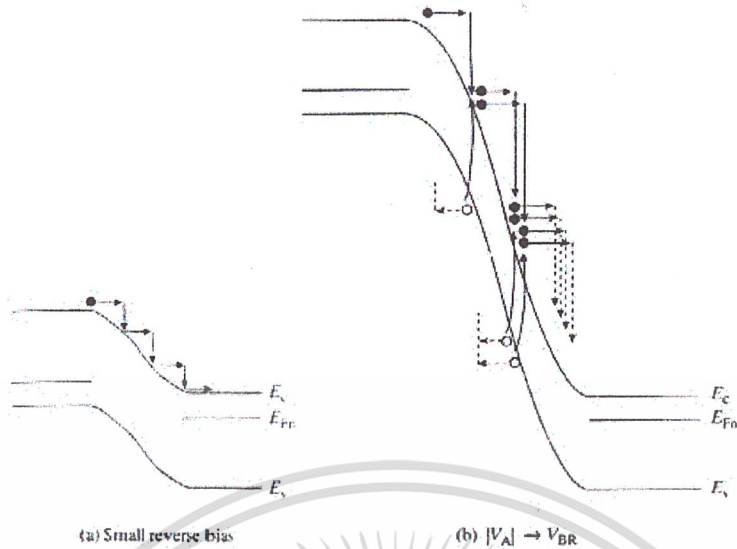
Deep level ขณะไบอัสกลับ

2.2.5 ปฏิกิริยาการพังทลายที่รอยต่อพี-เอ็น

ถึงแม้ว่าช่วงแรงดันพัง (Breakdown voltage) จะเป็นช่วงที่มีกระแสไหลอย่างมากแต่ก็ไม่ได้หมายความว่าทำให้ไดโอดเสียหายเสมอไป เพราะมีการจำกัดกระแสที่ไหลโดยหลักเล็งอุณหภูมิที่สูงๆ แต่ที่หลักเล็งการเกิดการพังทลายไม่ได้เมื่อป้อนไบอัสกลับค่าที่สูงค่าๆหนึ่ง โดยจะแบ่งเป็น 2 แบบคือ

1. การพังทลายแบบอะวาลานซ์ (Avalanche breakdown)

การพังทลายแบบนี้ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไบอัสกลับ (Reverse-Biased ; V_{BR}) โดยกระแสย้อนกลับ (Reverse current) จะเกิดจากพาหะส่วนน้อยที่อยู่บริเวณปลอดพาหะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อพี-เอ็น เองจนกระทั่งทำให้เกิดการชนกันของอิเล็กตรอน กับอะตอมที่อยู่ข้างเคียงไปเรื่อยๆ เกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระขึ้นใหม่ทวีคูณอย่างนี้ไปเรื่อยๆ



รูปที่ 2.9 แสดงการเกิดการพังทลายแบบอะวาลันซ์ (Avalanche breakdown)

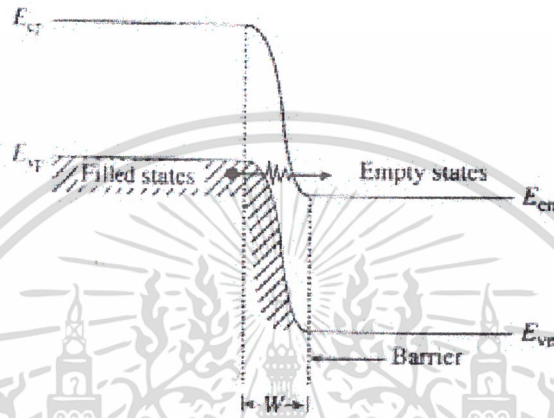
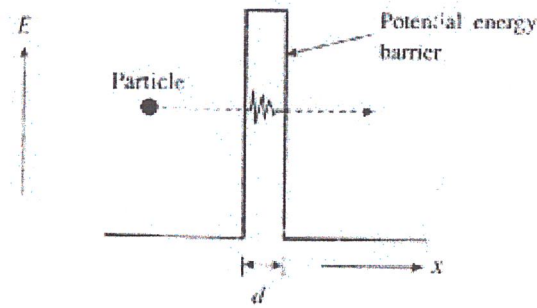
โดยค่ากระแสที่เพิ่มขึ้นด้วยพหุคูณเรียกว่า Multiplication Factor (M) หาได้จากสมการ

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{VA}{VB}\right)^n} \tag{2.10}$$

โดยที่ n มีค่า 3 และ 6 สำหรับสารกึ่งตัวนำเยอรมาเนียมชนิดเอ็นและพี
 N มีค่า 4 และ 2 สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอนชนิดเอ็นและพี
 VA คือ แรงดันไบอัสย้อนกลับ
 VB คือ แรงดันย้อนกลับที่จะทำให้เกิดการพังทลายแบบอะวาลันซ์

2. การพังทลายแบบซีเนอร์ (Zener Breakdown)

การพังทลายแบบซีเนอร์เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การทะลนกลง (Tunneling) เพราะเมื่อป้อนแรงดันไบอัสกลับ แล้วจะเกิดปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอน เคลื่อนที่ทะลุผ่านกำแพงศักย์ การพังทลายแบบนี้แม้จะป้อนแรงดันไบอัสกลับ ไม่สูงนักก็จะทำให้เกิดการพังทลายได้เพราะ 2 สาเหตุ คือ บริเวณรอยต่อมีความหนาแน่นของสารเจือที่สูงอยู่แล้ว และเนื่องจากบริเวณปลอดพาหะแคบมากนั่นเอง โดยค่าสนามไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าสูงตามไปด้วยทำให้ยิ่งไปเร่งอิเล็กตรอน ให้วิ่งด้วยความเร็วสูงทะลุผ่านกำแพงศักย์ เกิดเป็นกระแสไหลเป็นจำนวนมากๆ ได้



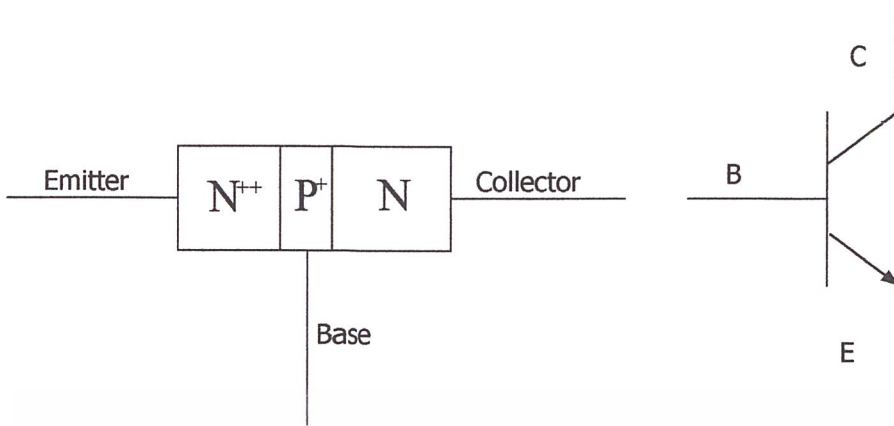
รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดการพังทลายแบบซีเนอร์ (Zener breakdown)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่รอยต่อ พี-เอ็น ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อ พี-เอ็น จนสมการกระแสของรอยต่อ เมื่อมีการให้ทั้ง ไบอัสตรงและ ไบอัสกลับ แล้วนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์จะได้กราฟ ดังรูปที่ 2.6

2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

เนื่องจากลักษณะของรอยต่อของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ในโครงการนี้ มีลักษณะคล้ายไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์จึงเสนอทฤษฎีของ เอ็น-พี-เอ็น ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ โดยคุณสมบัติของมันคือมีบริเวณการได้ปัสสารเจือแยกกัน เกิดมี 2 รอยต่อที่อยู่ใกล้กัน พอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาภายในระหว่างรอยต่อทั้งสอง ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์มีรอยต่อพีเอ็นมากกว่าหนึ่งรอยต่อ การไบอัสจึงจัดให้รอยต่อหนึ่งได้รับไบอัสตรงและอีกรอยต่อหนึ่ง ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับที่เหมาะสม การเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยในไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์จะเป็นส่วนสำคัญทางฟิสิกส์ของอุปกรณ์การเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยจะเป็นกระแสกรแพร่ เราจะสามารถทำการวิเคราะห์หาการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยที่ทำให้เกิดกระแสแพร่และกระแสที่ไหลในแต่ละส่วนของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เรียกว่าแหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage controlled current source) แฟลคเตอร์ที่ใช้กันคือ $\beta(I_c / I_B)$ เบต้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

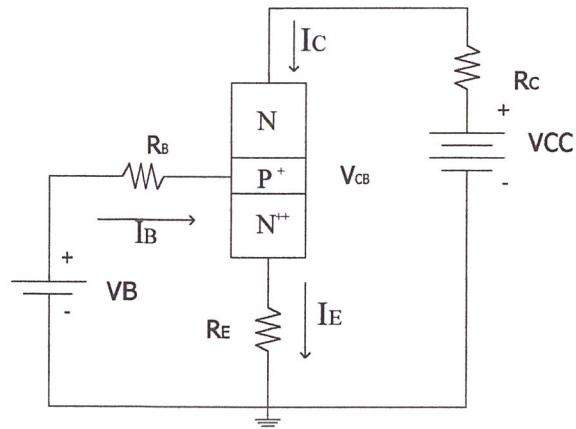


รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เอ็น-พี-เอ็น

จากรูปการทำงานของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์จะมีบริเวณที่ทำการได้แยกจากกัน 3 ส่วน และมีรอยต่อพีเอ็น 2 รอยต่อดังรูปที่ 2.11 ซึ่งแสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์

ขั้วทั้ง 3 ที่ต่ออยู่มีชื่อเรียกว่าอิมิตเตอร์ (Emitter), เบส (Base) และคอลเลคเตอร์ (Collector) ความกว้างของบริเวณเบสซึ่งเป็นบริเวณที่มีระยะความกว้างน้อย เมื่อเทียบกับระยะการแพร่ของพาหะส่วนน้อยเครื่องหมาย ++ และ + จะบอกลึค่าความเข้มข้นของการได้ปสารเจือที่ใช้ในไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ บริเวณอิมิตเตอร์จะมีความเข้มข้นสารเจือมากที่สุด ในส่วนคอลเลคเตอร์จะมีความเข้มข้นน้อยที่สุด

โครงสร้างดังในรูปที่ 2.11 เป็นโครงสร้างพื้นฐานของทรานซิสเตอร์ การที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ในลักษณะฟอร์เวิร์ดแอกทีฟโหมด (Forward active mode) จะทำได้โดยให้ไบอัสตรงบริเวณรอยต่อ เบส-อิมิตเตอร์และไบอัส กลับตรงรอยต่อ เบส-คอลเลคเตอร์ ลักษณะการไบอัสเช่นนี้จะทำให้อิเล็กตรอนจากอิมิตเตอร์ถูกฉีดข้ามรอยต่อ เบส-อิมิตเตอร์ เข้าไปในเบสและด้วยระยะความกว้างของเบสที่สั้นกว่าระยะแพร่ของอิเล็กตรอน (Diffusion longer) ทำให้พาหะส่วนน้อยจากอิมิตเตอร์ฉีดข้ามไปยังคอลเลคเตอร์ได้ เนื่องจากรอยต่อ เบส-คอลเลคเตอร์ ได้รับไบอัสย้อนกลับ ดังนั้นความเข้มข้นของพาหะส่วนน้อยที่ขอบของรอยต่อ เบส-คอลเลคเตอร์ จะน้อยเข้าไปใกล้ศูนย์ ทำให้บริเวณปลอดพาหะแคบ จึงทำให้อิเล็กตรอนแพร่ข้ามเข้าไปได้ง่ายขึ้น



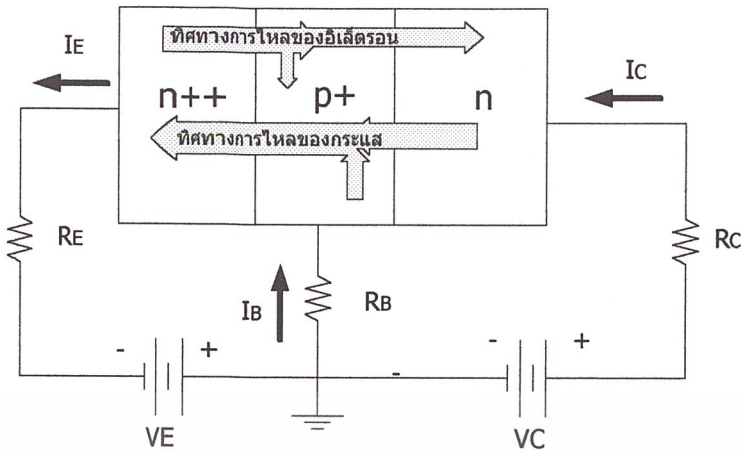
รูปที่ 2.12 แสดงการไบอัสไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ในฟอร์เวิร์คแอกทิฟโหมด

จากรูปที่ 2.12 แสดงการไบอัสทรานซิสเตอร์เบื้องต้น กล่าวคือหากว่าแรงดัน V_{BC} น้อยหรือเป็นศูนย์จะทำให้อิเล็กตรอนพาหะส่วนน้อยจากอิมิตเตอร์ จะไม่ถูกฉีดเข้าไปในเบสรอยต่อ เบส-คอลเลคเตอร์ ถูกไบอัสกลับด้วยดังนั้น กระแสอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์จะเป็นศูนย์ ในกรณีนี้เรียกว่า คัทออฟ (Cutoff)

เมื่อรอยต่อ เบส-อิมิตเตอร์ ไบอัสไปหน้ากระแสอิมิตเตอร์จะเกิดขึ้นและการฉีดของอิเล็กตรอนเข้าไปในเบสจะทำให้เกิดกระแสคอลเลคเตอร์ถ้า V_{CC} มีค่ามากพอและ V_R มีค่าน้อยแล้ว V_{BC} น้อยกว่า 0 ซึ่งหมายความว่ารอยต่อ เบส-คอลเลคเตอร์ จะถูกไบอัสย้อนกลับ เรียกกรณีนี้ว่า “ฟอร์เวิร์คแอกทิฟ โหมด” เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_{CC} - I_C R_C - V_{BE} + V_{EE} = V_R - V_{BC} + V_{BE} \quad 2.11$$

เมื่อเพิ่มแรงดัน เบส-อิมิตเตอร์ ไบอัส ตรงกระแสคอลเลคเตอร์ ทำให้ V_R เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งก็หมายถึงถึงแรงดันไบอัสย้อนกลับ เบส-คอลเลคเตอร์ลดลง โดยที่กระแสคอลเลคเตอร์ อาจจะมีค่าพอที่จะทำให้ผลรวมของ V_R และ V_{CC} มีแรงดันตกคร่อมรอยต่อ เบส-คอลเลคเตอร์ การเพิ่มขึ้นของกระแส I_C เพียงเล็กน้อยจากค่านี้จะทำให้ V_R เพิ่มขึ้นเล็กน้อยและรอยต่อ เบส-คอลเลคเตอร์ จะกลับมาเป็นแรงดันไปหน้า เรียกกรณีนี้ว่า อิ่มตัว (Saturation) ในการทำงานแบบอิ่มตัวตรงรอยต่อ เบส-อิมิตเตอร์ และ เบส-คอลเลคเตอร์ จะถูกไบอัสไปหน้าและกระแสคอลเลคเตอร์จะไม่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน เบส-อิมิตเตอร์อีกต่อไป



รูปที่ 2.13 แสดงทิศทางของกระแสและทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนเมื่อไบอัสแบบฟอร์เวิร์ดแอกทีฟโหมด

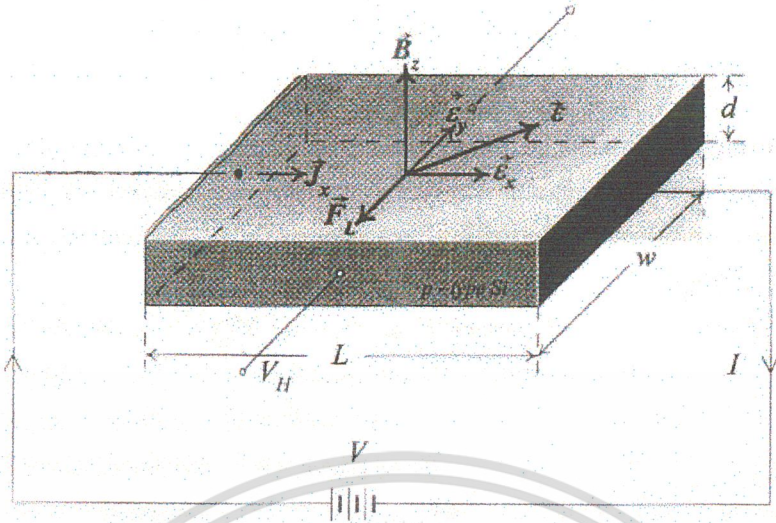
จากรูปที่ 2.13 สามารถแสดงสมการการไหลของกระแสและของทรานซิสเตอร์แบบ NPN เขียนเป็นสมการกระแสได้ดังนี้

$$I_E = I_C + I_B \quad 2.12$$

2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

ปรากฏการณ์ฮอลล์ เป็นการวัดค่าความหนาแน่นของพาหะ ชนิดของพาหะและสภาพคล่องของพาหะ คือ ขณะที่กระแส J_x ไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำในทิศทาง (+X) เมื่อให้สนามแม่เหล็ก B_z ตัดผ่านในทิศทาง Z โดยตั้งฉากกับทิศทางของกระแสจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น โดยมีทิศทาง Y ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของกระแสและทิศทางของสนามแม่เหล็ก

ตัวอย่างสารกึ่งตัวนำชนิดนี้แท่งหนึ่ง ซึ่งยาว L กว้าง W และหนา D ถูกนำไปต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันความต่างศักย์ V_x โวลต์ ทำให้เกิดกระแส J_x ไหลในทิศ +X และให้สนามไฟฟ้า B_z ตัดผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำในทิศ Z โดยตั้งฉากกับทิศทางกระแสดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ ในสารกึ่งตัวนำหน้าที่ยังรูป
โพลพาหะส่วนมาก

เมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า E_x จะเกิดมีแรงกระทำต่อประจุ ทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V_x ในทิศทาง +x และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_z ตัดผ่าน โดยมีทิศทางตั้งฉากกับกระแสจะเกิดมี "แรงลอเรนซ์" (Lorentz force) กระทำต่อประจุโดย

$$F_L = qV \times B \quad 2.13$$

ซึ่ง F_L คือ แรง ลอเรนซ์ และมีขนาดเป็น

$$|F| = qV \times B_z \quad 2.14$$

ทิศทางของแรงลอเรนซ์ คือ $-y$ ดังนั้นจะทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาทางแกน $-y$ และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ ด้านตรงข้ามจึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้นมา ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน E_y มีทิศ $+y$ สนามไฟฟ้านี้จะต่อต้าน การเคลื่อนที่ของ โฮล ซึ่งถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ ในสภาวะสมดุลย์และ Steady state ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ตรงไปในทิศ $+x$ ได้ แสดงว่า แรงลอเรนซ์ (F_y) และแรงสนามไฟฟ้าภายใน (qE_y) มีค่าเท่ากัน

$$E_H = +V_x B_z \quad 2.15$$

$$J_x = -nqV_x \quad 2.16$$

$$E_H = \frac{-J_x B_z}{nq} \quad 2.17$$

$$E_H W = \frac{-J_x w + B_z}{nqt} \quad 2.18$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

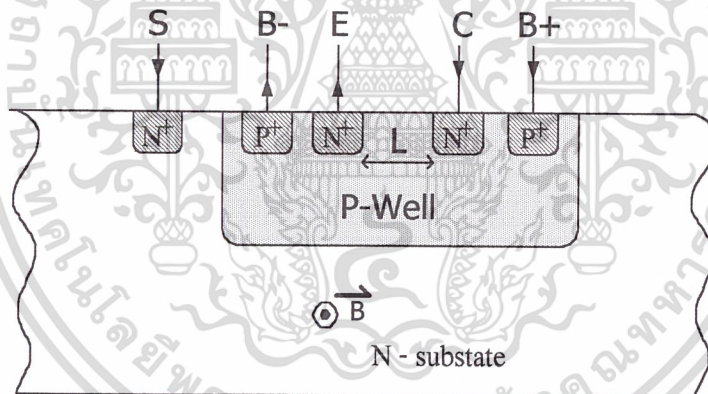
$$V_H = \frac{-I_x B_z}{nqt} \quad 2.19$$

$$R_H = \frac{-1}{nq} \quad 2.20$$

โดย	E	คือ สนามไฟฟ้าในทิศทางตามสับสคริป
	I	คือ กระแสไฟฟ้าในทิศทางตามสับสคริป
	B	คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในทิศทางตามสับสคริป
	V_H	คือ แรงดันฮอลล์
	R_H	คือ สัมประสิทธิ์ฮอลล์
	n	คือ ความหนาแน่นของประจุพาหะ
	t	คือ ความหนา
	w	คือ ความกว้าง

2.5 โครงสร้างของเมกนีโตทรานซิสเตอร์ และ การทำงาน

โครงสร้างของ เมกนีโตทรานซิสเตอร์ตามขวาง (LMT) ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ภาพตัดขวางของเมกนีโตทรานซิสเตอร์ n-p-n ที่ใช้ในการทดลอง

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นว่าตัวอุปกรณ์ถูกสร้างลงบนชั้นพีเวลด ซึ่งโครงสร้างของทรานซิสเตอร์จะมี ลักษณะของเบสที่เป็น 2 ขั้ว คือ B+ และ B- จะเร่งทำให้เกิดแรงดันขึ้น ขั้ว n+ 2 ขั้วใน p-well คือ ขั้วอิมิตเตอร์และขั้วคอลเลคเตอร์ ถูกแยกออกจากกันด้วยความกว้างของระยะขั้วเบส ส่วนขา substrate (S) จะทำหน้าที่คล้าย ๆ กับขาคอลเลคเตอร์อีกขาหนึ่ง ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก ขา S จะไม่มีผลกระทบอะไรหรือน้อยมาก

อุปกรณ์ตัวนี้จะมีรูปร่างคล้าย MOS transistor ส่วนของเบสจะถูกปกคลุมด้วยออกไซด์แต่จะเป็นมอสที่มีขาเกต เหตุผลที่สร้างในลักษณะนี้ คือ เพื่อให้การสร้างทำได้ง่าย ด้วยกระบวนการสร้างซีมอส ที่ว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไป ขา E และ C สามารถทำจากขา ซอส และ เครน ของซิมอสทั่วไป และทำให้่ายต่อการควบคุมกระแสที่ไหลในเบส ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญของความไวในการทำงาน และเพื่อประสิทธิภาพของตัวอุปกรณ์

พิจารณาการทำงานของตัวอุปกรณ์ สมมติว่าเราไบอัสให้เพียงพอในฟอร์เวิร์ดแอกทีฟโหมด รอยต่อของอิมิตเตอร์เบสได้รับการไบอัสตรงคู่ของรอยต่อ คอลเลคเตอร์เบสได้รับแรงดันไบอัสกลับ ให้ขาของ B+ มีค่าความเป็นบวมมากกว่า B- เพื่อ เร่งสนามไฟฟ้า E_b ในบริเวณเบส (Base region) อิเล็กตรอนจะถูกฉีดในเบสอย่างมาก จากอิมิตเตอร์ไปทางด้านขวาของเวลล์ด้านข้าง (Side well) พวกมันจะถูกผลักไปในทิศทางเดียวกันตามความกว้างของระยะเบสจนถึงคอลเลคเตอร์ (C) ทำให้เกิดกระแส IC อย่างไรก็ตาม กระแสการแพร่ (Diffuse current) และรวมไปถึงกระแสพัดพา (Drift current) บางส่วนจะถูกรวมในสนามไฟฟ้า (E_b) จะแพร่ลงสู่ชั้นฐานรอง (Substrate) และไหลลงสู่ขาฐานรอง (S) และจะทำให้เกิดกระแส I_s สนามไฟฟ้าที่เร่งภายใน p-well จะช่วยให้ได้สัดส่วนของกระแส I_c และกระแส I_s เมื่อเราให้สนามแม่เหล็ก \vec{B} ที่ตั้งฉากดังรูปที่ 2 มันไปทำให้อัตราส่วนของกระแส I_c/I_s เปลี่ยนไป ตามหลักจะทำให้การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นแบบทวิคูณ เหตุที่ทำให้เกิดเหตุการณ์นี้ คือ การหักเหของอิเล็กตรอนที่ไหล เมื่อทิศทางของสนามดังในรูป แรงลอเรนซ์จะหักเหทิศทางของอิเล็กตรอนลงสู่รอยต่อฐานรองและในขณะที่เดียวกันอิเล็กตรอนจะทำให้กระแส I_c ที่ไหล ให้ไบอัสกลับที่รอยต่อ เบส-ฐานรองเกิดการรวมตัวอย่างรวดเร็วที่ผิวคล้าย ๆ กับแมกนีโตไดโอด

เมื่อทิศทางของสนามแม่เหล็ก \vec{B} กลับกัน อิเล็กตรอนก็จะหักเหในทิศทางตรงกันข้ามกับครั้งแรก คือ ไหลสู่ผิวของอุปกรณ์ ทำให้กระแสของ I_c เพิ่มขึ้น แต่เหตุการณ์จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อไม่มีการรวมตัวใหม่ที่ผิวกับ ออกไซด์เท่านั้น และในการทดลองนี้ ไม่มีเกทที่จะช่วยในการผลัดการรวมตัวจึงอาจทำให้ไม่เห็นความแตกต่าง การแก้ปัญหาการรวมตัวใหม่ที่ผิวของตัวอุปกรณ์ทำได้โดยการไบอัสเกทให้มีค่าเป็นลบเพื่อผลักอิเล็กตรอนลงมานั่นเอง

ในการวิเคราะห์การทำงานของแมกนีโททรานซิสเตอร์ในรายละเอียดต่าง ๆ เราต้องแน่ใจว่าเป็นการฉีดระดับต่ำ (Low-injection condition) ให้ เอ็น น้อยกว่า พี มาก ๆ ดังนั้นในส่วนของเบส นี้การคำนวณและวิเคราะห์ถึงความเข้มข้นของกระแส 2 อันด้วยกันคือ กระแสโฮล (J_p) และกระแสอิเล็กตรอน J_n สมการพื้นฐานที่แสดงความหนาแน่นของกระแสในขณะมีสนามแม่เหล็กคือ

$$\vec{J}_n = \frac{1}{1 + (\mu_n^* B)^2} \left[(nq\mu_n \vec{E} + qD_n \nabla n) - \mu_n^* B \times (q\mu_n n \vec{E} + qD_n \nabla n) \right] \quad 2.21$$

เมื่อ μ_n^* คือ Hall mobility $\mu_n = r_n \mu_n$ (r_n คือ Hall scattering factor)

\vec{B} คือ สนามแม่เหล็ก

q คือประจุไฟฟ้ามีค่า $1.6 \times 10^{-19} C$

μ_n คือ ค่าสภาพคล่องของอิเล็กตรอน

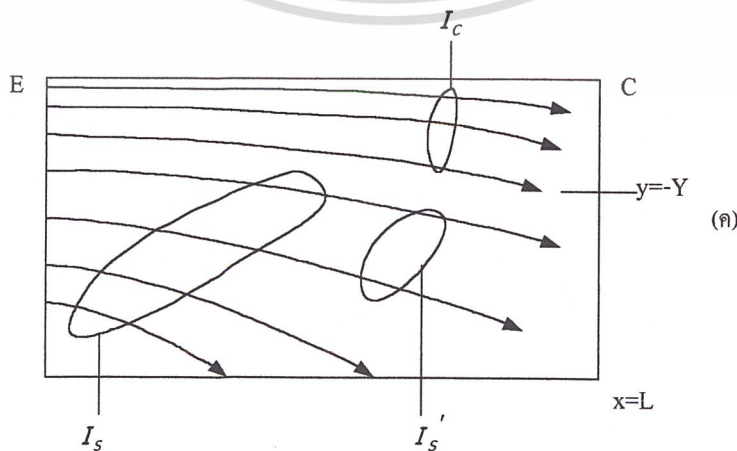
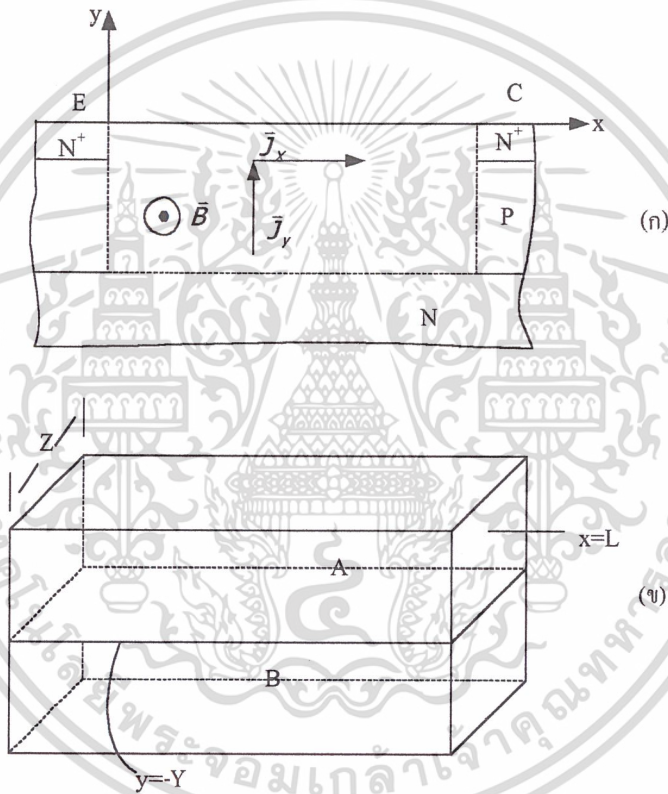
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- \vec{E} คือ สนามไฟฟ้า
- D_n คือ ระยะเวลาแพร่ของประจุ

ในทำนองเดียวกันความเข้มของกระแสไหล สามารถเขียนได้คล้ายกันเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ เพื่อให้สนามแม่เหล็กอ่อน ๆ จะได้

$$(\mu_n^* B)^2 \ll 1 \tag{2.22}$$

เราก็จะทำการเลือกให้บางทอมในสมการ(2.21) ทำการคำนวณกระแสที่ไหลในชั้นสาร โดยให้แม่เหล็กเหนี่ยวนำทางด้านทิศ X ทางเดียว ดังรูปที่ 2.16 (ก)



รูปที่ 2.16 ภาพตัดขวางส่วนของp-well ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทิศทางการไหลของประจุพาหะ และทำการเขียนสมการใหม่ได้ทางทิศ Z ทางเดียว ดังในรูปที่ 2.16(ก)

$$J_{ix} = J_{iox} + \mu_i^* B_z J_{ioy} \quad 2.23$$

$$J_{iy} = J_{ioy} - \mu_i^* B_z J_{iox} \quad 2.24$$

โดยที่ J_{iox} เป็นความหนาแน่นกระแสในทิศทาง x

J_{ioy} เป็นความหนาแน่นกระแสในทิศทาง y

และ ตัวห้อยแทนความหนาแน่นของพาหะ

$i = p$ แทนความหนาแน่นของโฮลที่แพร่

$i = n$ แทนความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่แพร่

จากสมการที่ 2.24

$$J_{nox} = nq\mu_n E_a \quad 2.25$$

กระแสอิเล็กตรอนที่ไหลในพื้นที่เบสซึ่งสามารถคำนวณได้จากความแรงของสนามไฟฟ้า E_a จะทำให้ได้สมการสนามไฟฟ้าฮอลล์ออกมา

$$J_{pox} = q\mu_p E_a \quad 2.26$$

สนามไฟฟ้าที่ไหลในเบสซึ่งสามารถคำนวณความแรงของสนามไฟฟ้า E_a และ $J_{py} = 0$ จะทำให้ได้สมการสนามไฟฟ้าฮอลล์ออกมา

$$E_{py}^H = \mu_p^* B_z E_a \quad 2.27$$

2.6 กลไกของทิศทางการหักเหของอิเล็กตรอน

ทำการสังเกตทิศทางการไหลของกระแสส่วนน้อยในพื้นที่เบส ซึ่งก็คืออิเล็กตรอนนั่นเอง ความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนในส่วนของเบส ของแมกนีโททรานซิสเตอร์ (LMT) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 กับ

$i = n$ จากสมการที่ (2.23) และ (2.24)

$$J_{nx} = J_{nox} + \mu_n^* B_z J_{noy} \quad 2.28$$

$$J_{ny} = J_{noy} + \mu_n^* B_z J_{nox} \quad 2.29$$

โดยที่

$$J_{nox} = \mu_n q n E_a + q D_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad 2.30$$

$$J_{noy} = q \mu_n n (E_b + E_{py}^H) + q D_n \frac{\partial n}{\partial y} \quad 2.31$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสมการความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ในสนามไฟฟ้า สนามฮอลล์ และ ความเข้มข้นของอิเล็กตรอน สนามไฟฟ้า ภายในจะเกิดขึ้นเพราะความไม่เท่ากันของ ในส่วนของเบส

$$E_b \cong -\frac{kT}{q} \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial y} \quad 2.32$$

ในการแสดงสมการเซ็นซิวิตี (Sensitivity) เราจะทำการแสดงเป็นรูปของส่วนเบส โดย ระบาย แนวนอน $y = -Y$ และแบ่งเบสออกเป็น 2 ส่วน คือ A และ B ในรูปที่ 2.16 (ข) เราจะทำการสมมติให้ความหนาแน่นกระแสทั้งหมดวิ่งไปถึงระบาย $X = L$ (L คือความยาวของเบส) ส่วนที่อยู่เหนือระบาย $y = -Y$ คือจุดปลายของขั้วคอลเลคเตอร์ และกระแสทั้งหมดไหลข้ามระบาย $y = -Y$ ยกตัวอย่าง คือ ออกจาก A ไหลเข้า B และจะมีส่วนหนึ่งไหลไปสู่ฐานรอง เป็นกระแส I_s เราสามารถเขียนสมการกระแสคอลเลคเตอร์ได้

$$I_c \cong \int_{-Y}^0 \int_0^Z J_{nx}(L) d_y d_z \quad 2.33$$

เมื่อทำการอินทิเกรตส่วนบนของระบาย $X = L$ และส่วน I_s ของกระแสฐานรอง

$$I_s \cong \int_0^L \int_0^Z J_{ny} dx dz \quad 2.34$$

เมื่อทำการอินทิเกรต J_{ny} ส่วนที่ไม่ได้ใช้บนของระบาย $y = -Y$

การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก จะเป็นสาเหตุให้การแพร่ของกระแสเข้าสู่ส่วน A ระหว่าง I_c และ I_s แนวความคิดพื้นฐานของเส้นทางกลไกการหักเห เราจะคำนวณหาประจุในกระแสคอลเลคเตอร์ โดยปริมาณของความสมดุลระหว่าง I_c และ I_s

$$\delta I_c = -\int_0^L \int_0^Z \delta J_{ny} P_{xc} dx dz \quad 2.35$$

เมื่อเราทำการอินทิเกรตอีกครั้งบนสมการ $y = -Y$ ให้ เป็นเปลี่ยนในความหนาแน่นกระแส J_{ny} มีสาเหตุจากสนามแม่เหล็กและ P_{xc} และมีความเป็นไปได้ที่อิเล็กตรอน จะข้ามระบาย $y = -Y$ ที่จุด a, x , ไปหาคอลเลคเตอร์ แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ความหนาแน่นของกระแสทั้งหมดจะเปลี่ยนที่ฐานรอง ไม่ใช่ที่คอลเลคเตอร์ พวกมันจะรวมตัวกันกับโฮลในฐานรองก่อนถึงคอลเลคเตอร์ หรือ โฮลมาที่ผิวด้านบนด้วยและมันจะมีอิทธิพลโดยตรงกับความเข้มข้นของอิเล็กตรอน เราคำนวณ J ได้มา (2.29) (2.30) (2.31) และ (2.27)

$$\delta J_{ny} \cong \left(\frac{dJ_{noy}}{dB} - \mu_n^* J_{nox} \right) \delta B_z \quad 2.36$$

$$\delta J_{ny} \cong \left[\mu_p^* q \mu_n n E_a - \mu_n^* (q \mu_n n E_a + q D_n \frac{\partial n}{\partial x}) \right] \delta B_z \quad 2.37$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ยของความเป็นไปได้ P_{xc} จะแสดงในอัตราส่วนของกระแสคอลเลกเตอร์และกระแสที่ไหลข้ามระนาบ x คือ ค่าคงที่ในส่วน A แสดงดังสมการ

$$P_{xc}(x) \cong \frac{I_c(0)}{\int_{-Y}^0 \int_0^Z J_{nox} dydz} \quad 2.38$$

$I_c(0)$ คือค่า $I_c(0)$ จากสมการที่ 11

B_z กำหนดให้เป็น 0

$J_{nox}(L) = J_{nox}(L)$ จะทำนายจากรูปที่ 2.16 (ค)

$P_{xc}(x)$ คือ โอกาสที่อิเล็กตรอนจะรอดไปยัง $x = L$ เป็นอัตราส่วนระหว่างกระแส I_c และกระแสในระนาบ x

เพื่อให้ง่ายเพื่อการวิเคราะห์และแสดงผล ก็จะทำการประมาณการค่าขึ้น โดยสมมติให้ส่วนประกอบของความหนาแน่นกระแส J_{nox} คงที่ที่หน้าตัดของระนาบส่วน X ของพื้นที่ A โอกาส

$$P_{xc}(x) \cong \frac{I_c(0)}{YZJ_{nox}} \quad 2.39$$

แทนสมการ (13),(14b),(16) และ (9a) ใน (1) yields จะได้ความสัมพันธ์ของกระแส

$$S^D = \frac{1}{YZ} \int_0^L \int_0^Z F dx dz \quad 2.40$$

$$F = \frac{\mu_p^* q \mu_n n E_a - \mu_n^* \left(q \mu_n n E_a + q D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right)}{q \mu_n n E_a + q D_n \frac{\partial n}{\partial x}} \quad 2.41$$

เราสามารถแบ่งขอบเขตการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตามขวางได้ 2 อย่าง ถ้าเราให้กำลังแรงของสนามไฟฟ้า E_a ค่าน้อยมาก ๆ อิเล็กตรอนที่วิ่งก็จะมาจากการแพร่

$$\mu_n n E_a \ll D_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad 2.42$$

เมื่อเราไม่คิดสนามไฟฟ้าจะได้สมการที่ 2.41 ว่า

$$S^D \cong -\mu_n^* \frac{L}{Y} \quad 2.43$$

ในกรณีตรงกันข้าม ถ้า

$$\mu_n n E_a \gg D_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad 2.44$$

จะได้ว่า

$$S^D \cong (\mu_p^* - \mu_n^*) \frac{L}{Y} \quad 2.45$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L คือ ความยาวระหว่างขาคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์

Y คือ ความกว้างของขาคอลเลคเตอร์ หรือ อิมิตเตอร์

หมายเหตุ : ค่าทั่ว ๆ ไปที่ใช้กันจะกำหนดให้ $\mu_p^* > 0$ และ $\mu_n^* < 0$

2.7 ความไวในการตรวจสอบสัญญาณแม่เหล็ก

จากปฏิกิริยาการรวมตัวของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ปริมาณเบื้องต้นของสนามแม่เหล็กสามารถอธิบายถึงความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก (H) แมกนีไทเซชัน(M) และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก(B) โดยทั้งหมดนี้เป็นปริมาณทางเวกเตอร์ซึ่งจะมีทิศทางที่สัมพันธ์กันดังสมการ

$$B = \mu_0(H + M) \quad 2.46$$

เมื่อ μ_0 คือ permeability ของสุญญากาศ และในวัสดุที่ไม่ใช่แม่เหล็ก เช่น ซิลิกอน แมกนีไทเซชันจะเป็น $M=0$ จะได้ดังสมการ

$$B = \mu_0 H \quad 2.47$$

ซึ่ง B จะเป็นปริมาณที่มีความสำคัญมากเมื่อมากระทำกับสนามไฟฟ้าบนพาหะที่เคลื่อนที่ เมื่อประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ที่มีความเร็ว v ในการรวมตัวของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กทำให้เกิดผลดังสมการ

$$m \left(\frac{dv}{dt} \right) + m \left(\frac{v}{\tau} \right) = qE + q(v \times B) \quad 2.48$$

เมื่อ m คือ effective mass ของพาหะ
 v คือ ความเร็วเวกเตอร์ของประจุพาหะ
 τ คือ mean collision time
 q คือ ประจุพาหะ
 E คือ สนามไฟฟ้า
 B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

เทอมทางด้านซ้ายของสมการแสดงถึงอัตราส่วนของประจุโมเมนตัม และแรงทั้งหมดของประจุพาหะ ส่วนเทอมทางด้านขวาแสดงถึงแรงคูลอมบ์(qE) และเทอมที่ 2 แสดงถึงแรงลอเรนซ์($qv \times B$) แรงลอเรนซ์จะขึ้นอยู่กับ B และ v ซึ่งเป็นปริมาณเวกเตอร์ และสาเหตุของการหักเหทิศทางของพาหะของสนามไฟฟ้าโดยมุมฮอลล์ θ_H โดยอธิบายดังสมการ

$$\tan \theta_{Hn} = \mu_n n B (\text{electrons}) \quad 2.49$$

$$\tan \theta_{Hp} = \mu_p p B (\text{holes}) \quad 2.50$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ μ_{Hn} กับ μ_{Hp} คือ Hall mobility ของอิเล็กตรอนและโฮลจากสมการการหักเหจะขึ้นอยู่กับปริมาณของ B และแตกสมการออกได้ดังนี้

$$\mu_{Hn} = r_n \mu_n \quad 2.51$$

$$\mu_{Hp} = r_p \mu_p \quad 2.52$$

เมื่อ r_n กับ r_p เป็น Hall factor ของอิเล็กตรอนและโฮล

μ_n กับ μ_p เป็น mobility ของอิเล็กตรอนและโฮล

ในที่นี้ ค่าของ $r_n = r_p$ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ในที่นี้ให้อิเล็กตรอนเป็นผลของการหักเห เพราะมีปริมาณมากกว่า จากโครงสร้างดังตัวอย่างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ตัวอุปกรณ์จะอยู่ใน P-well จะทำหน้าที่รองรับส่วนที่เป็นเบส B_1 และ B_2 ใช้สำหรับการไบอัสให้อุปกรณ์เกิดสนามไฟฟ้าไหลตามขวาง ส่วนที่เป็น n^+ 2 ส่วนจะใช้เป็นส่วนอิมิตอร์ และคอลเลคเตอร์ โดยจะแยกจากกันโดยระยะความยาวเบส L ส่วนรอยต่อพีเวล กับฐานรองชนิดเอ็น จะถูกไบอัสกลับเพื่อเกิดเป็นส่วนแยกอุปกรณ์ออกจากกันและประพุดิตัวเป็น คอลเลคเตอร์แผ่นนั่นเอง ซึ่งทรานซิสเตอร์จะทำงานได้โดย รอยต่ออิมิตอร์-เบส ให้ไบอัสตรง ส่วนรอยต่อคอลเลคเตอร์-เบส ให้ไบอัส กลับ เป็นผลให้อิเล็กตรอนจะถูกฉีดเข้าไปที่ขาคอลเลคเตอร์หรือคอลเลคเตอร์แผ่น ถ้าเราให้ศักย์ไฟฟ้าของ B^+ มากกว่า B^- ก็จะเกิดกระแสรีฟลักอิเล็กตรอนไปยังขาคอลเลคเตอร์เพิ่มมากขึ้นเรียกกระแสนี้ว่า I_{C0} และขณะที่ป้อนสนามแม่เหล็กตามขวางกับตัวอุปกรณ์ทำให้แรงลอเรนซ์ผลักอิเล็กตรอนไปที่ขาคอลเลคเตอร์เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิมอีก เรียกกระแสนี้ว่า I_C จะได้เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงดังนี้

$$\Delta I_C = I_C - I_{C0} \quad 2.53$$

และจะได้ความสัมพันธ์ของความไวในการตอบสนอง(Relative sensitivity) ดังสมการ

$$S_r = \frac{\Delta I_C}{I_{C0}} \times \frac{1}{B} \quad 2.54$$

เมื่อ $\Delta I_C = I_C - I_{C0}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเลคเตอร์

I_{C0} คือ กระแสคอลเลคเตอร์เมื่อยังไม่มีสนามแม่เหล็ก

I_C คือ กระแสคอลเลคเตอร์เมื่อมีสนามแม่เหล็ก

บทที่ 3

ทฤษฎีของกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

กระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในปัจจุบันสามารถพัฒนาไปอย่างรวดเร็วทั้งนี้เพื่อที่จะได้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น โดยส่วนใหญ่แล้วพยายามที่จะสร้างลงบนชิพให้ได้ตัวอุปกรณ์ให้ได้มากๆ เป็นการประหยัดต้นทุนด้วย อาจจะเป็นวงจรรวม (IC) ซึ่งนั่นก็คือ ต้องมีห้องปฏิบัติการที่มีความสะอาดสูง เทคโนโลยีที่มีความเที่ยงตรงสูงตามไปด้วย แต่หากว่าในปริยญาณิพนธ์นี้จะเป็นวิธีการสร้างง่ายๆซึ่งเป็นพื้นฐานในการสร้าง โดยทั่วไปซึ่งเป็นกระบวนการสร้างที่ใช้ในการสร้างแมกนิโตทรานซิสเตอร์ซึ่งกระบวนการสร้างที่สำคัญๆมีดังต่อไปนี้

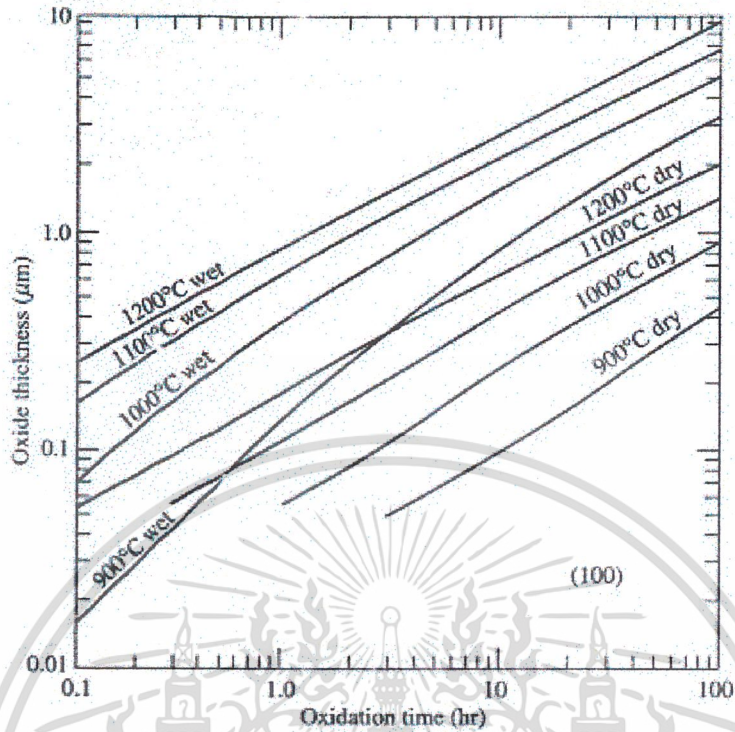
3.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)

โดยทั่ว ๆ ไปแล้วการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิดจะต้องมีการใช้สารกึ่งตัวนำและฉนวน ดังนั้นฉนวนที่สร้างบนชั้นซิลิกอนที่จะสร้างได้สะดวกและดีที่สุดคือการสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide) คือ การสร้างออกไซด์บนชั้นซิลิกอน ซึ่งความปกติแล้วขณะอุณหภูมิห้องทั่วไปก็จะมีออกไซด์เกิดขึ้นบนผิวของซิลิกอนอยู่แล้ว ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) นี้จะเป็นฉนวน โปร่งแสง ใช้เคลือบผิวหน้าของซิลิกอนและป้องกันการแพร่ของสารเจือเข้าไปในซิลิกอนได้ดี ชั้นออกไซด์นี้สามารถสร้างได้ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation) โดยการทิ้งให้แผ่นซิลิกอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำในบรรยากาศซึ่งมีอุณหภูมิสูง โดยมีสมการทางเคมีแสดงได้ดังนี้

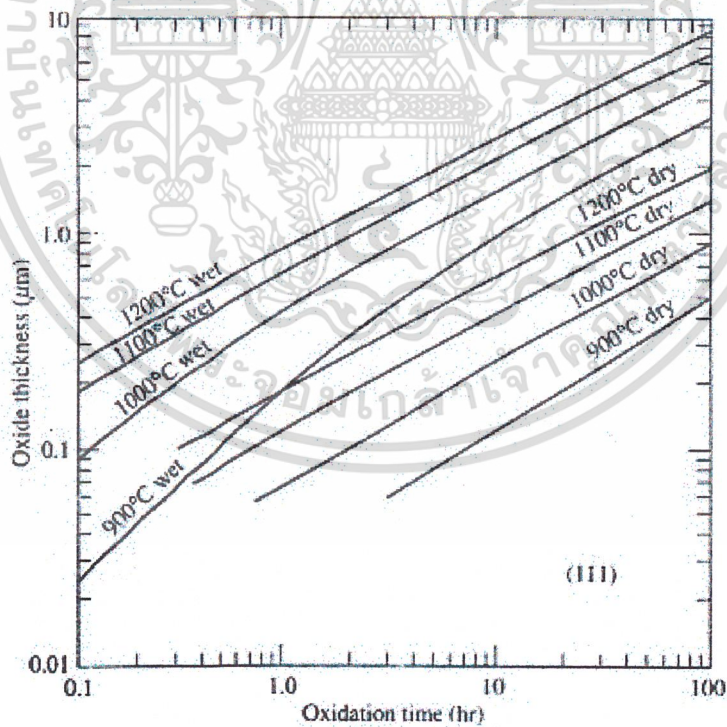


ขั้นตอนการทำออกซิเดชัน (Oxidation process) คือ เตรียมแผ่นซิลิกอนโดยต้องทำความสะอาดแผ่นให้สะอาดเสียก่อน จากนั้นวางลงบนโบบัต (Boat) แล้วใส่เข้าไปในท่อควอตซ์โดยใช้ท่อกลมเรียวยาวที่ทำด้วยควอตซ์ใช้ในการดันโบบัตอย่างช้า ๆ เพื่อไม่ให้แผ่นซิลิกอนแตกเพราะจะเจอกับอุณหภูมิที่สูงเกินไป จากนั้นค่อยดันโบบัตจนถึงตรงกลางของเตาในการทำออกซิเดชัน ความหนาของชั้นออกไซด์ จะขึ้นอยู่กับเวลาและแบบในการทำออกซิเดชันด้วยชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ดังกล่าวจะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดีและสามารถดูความหนาได้ตามกราฟรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

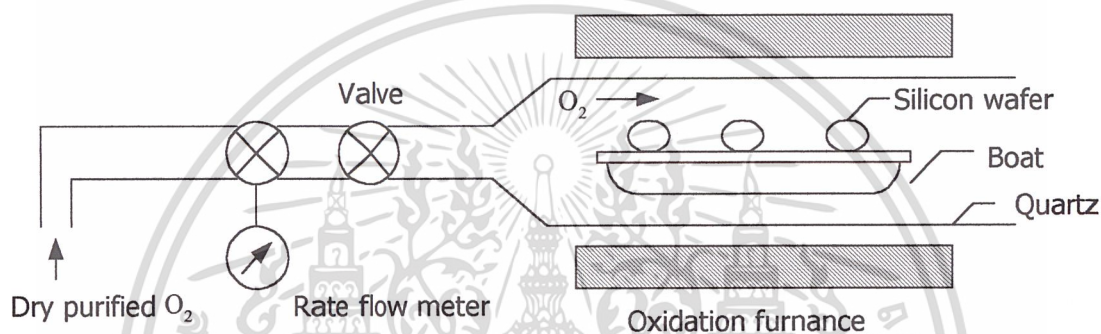
รูปที่ 3.1 แสดงอัตราการเกิดของชั้นซิงเกิลไดออกไซด์ ของการออกซิเดชันระนาบ (100) และ(111)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะสามารถควบคุมความหนาของชั้นออกไซด์ บนผิวซิลิกอนได้โดยการให้ความร้อนกับออกซิเจนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ $900 - 1200^{\circ}\text{C}$ การออกซิเดชันสามารถทำได้ 2 แบบ คือ

3.1.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation)

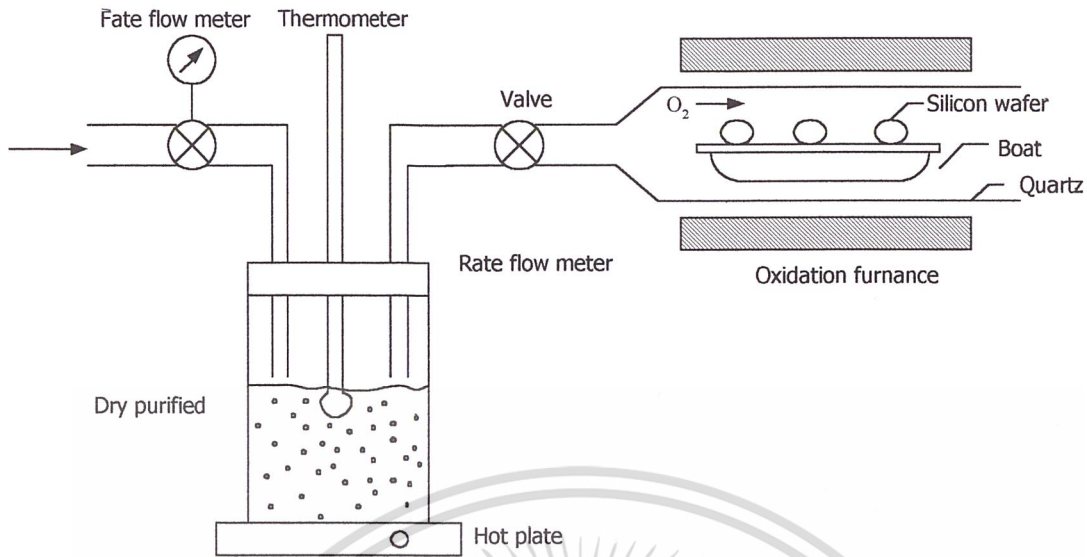
เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 1200°C ตามสมการที่ (3.1) จะทำให้อะตอมของซิลิกอนรวมตัวกับออกซิเจนจนเกิดเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ และมีอุปกรณ์ที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ทำกระบวนการ ออกซิเดชันแบบแห้ง

3.1.2 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิกอนกับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำปฏิกิริยานี้แสดงในสมการที่ 3.2 นั้นเอง ทำได้โดยการปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าไปในขวดแก้ว ซึ่งบรรจุน้ำบริสุทธิ์ไว้ในขวดแก้วที่ถูกให้ความร้อนประมาณ 90°C ท่อก๊าซออกซิเจนจะต่อไว้ในขวดแก้วแล้วเมื่อเกิดเป็นไอน้ำแล้วจะเป็นไอน้ำที่ถูกป้อนเข้าไปในเตาพร้อมกับออกซิเจนบริสุทธิ์ ดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงอุปกรณ์ระบบไอน้ำ ของการออกซิเดชันแบบขึ้น

กระบวนการออกซิเดชันแบบขึ้นนี้จะทำให้เกิดชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ได้เร็วกว่าแบบแห้ง เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเล็กกว่าโมเลกุลของออกซิเจนจึงทำให้อะตอมของซิลิกอนเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่า แต่จะมีข้อเสีย คือ มีคุณสมบัติการเป็นฉนวนที่ต่ำกว่าแบบแห้ง เพราะมันจะมีรูพรุนเกิดขึ้น กราฟแสดงความหนาของการออกซิเดชันแบบขึ้น สามารถดูได้จากรูปที่ 3.1

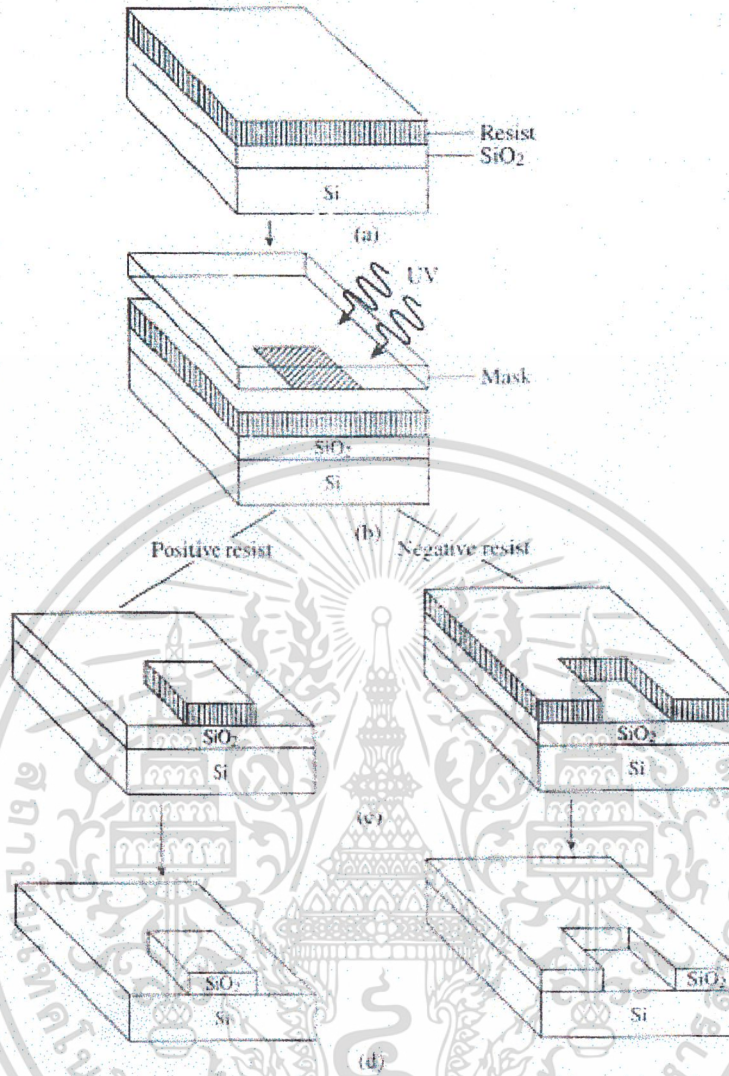


รูปที่ 3.4 แสดงเตาที่ใช้ในกระบวนการทำออกซิเดชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photo lithography)

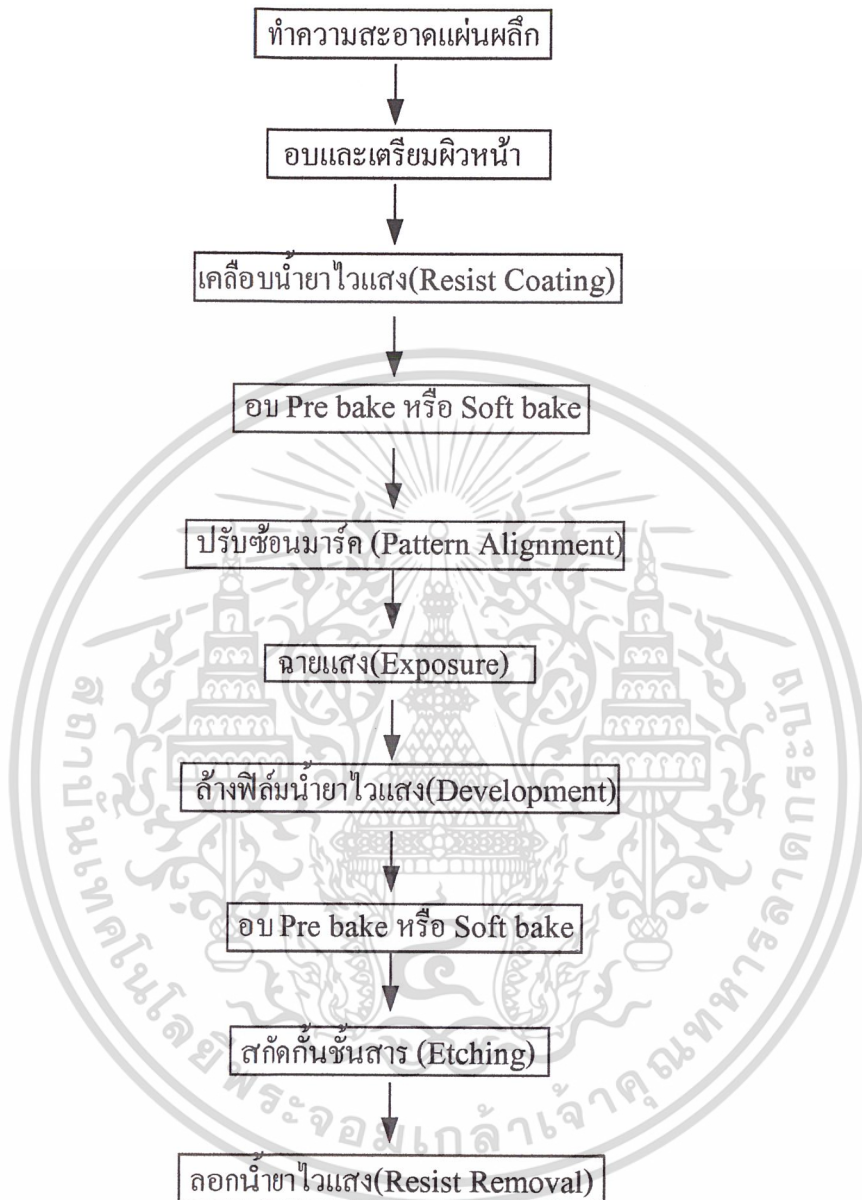
เป็นวิธีการนำลวดลายบนมาร์คที่ต้องการ ไปอยู่บนแผ่นซิลิกอน โดยการพิมพ์ภาพด้วยแม่พิมพ์ เรียบที่สร้างขึ้นเพื่อการสกัดชั้นสารของซิลิกอนไดออกไซด์ ในบางส่วนหรือในบริเวณที่ต้องการ โดยอาศัย เทคนิคทางแสง (Optical technique) ซึ่งคล้ายกับเทคนิคในการถ่ายภาพ ด้วยการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยา จะมีผลทำให้เกิดภาพซึ่งคล้ายกับเทคนิคในการถ่ายภาพ ด้วยการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยา จะมีผลทำให้เกิด ภาพหรือลวดลายขึ้น กระบวนการคือ เริ่มต้นจากการนำแผ่นผลึกซิลิกอน ซึ่งมีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์อยู่ บนผิวด้านบนนำไปเคลือบผิวหน้าด้วยน้ำยาไวแสงจากนั้นนำไปฉายแสงโดยผ่านกระจกลวดลายต้นแบบ ที่เรียกว่าโฟโตมาร์ค (Photo mark) ซึ่งทำหน้าที่เป็นต้นแบบที่มีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจก ซึ่ง ได้มาจากการออกแบบ แสงที่ฉายผ่านกระจกมาร์คจะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลายแสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสงจึงมีบริเวณที่ถูกแสงและไม่ถูกแสง บริเวณที่ถูกแสงจะทำให้ปฏิกิริยาเคมีของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนไปแล้วแต่คุณสมบัติ และแตกต่างกันตาม ชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่นซิลิกอนไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไว แสงถูกละลายออกไปบางส่วนจะคงเหลือค้างอยู่ ปกคลุมอยู่บนผิวของซิลิกอนไดออกไซด์ และจะทำหน้าที่ ป้องกันไม่ให้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์บริเวณนี้ถูกสลัดออกไปเมื่อถูกสกัดหรือเอตซิงค์ (Etching) ด้วย “สารตัวสกัด” หรือเอตแอนด์ เช่น กรดกัดแก้ว (HF) เป็นต้น ซึ่งในขั้นตอนของการเอตซิงค์ แผ่นผลึกจะถู กนไปทำปฏิกิริยาเคมีกับสารเคมีที่เป็นสารตัวสกัดหรือเอตเชนท์ ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะสามารถ สกัดหรือละลายชั้นออกไซด์ออกไป หลังจากนั้นก็ทำการลอกน้ำยาไวแสงออก ก็จะได้ภาพเหมือนกระจก มาร์ค ลำดับขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยทั่วไปแสดงได้ดังในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี สามารถแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงแผนผังขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

3.3 กระบวนการแพร่สารเจือ (Diffusion process)

การแพร่สารเจือเป็นกระบวนการเติมสิ่งแปลกปลอมให้กับสารกึ่งตัวนำเพื่อให้สารกึ่งตัวนำนั้นมีความสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นหรือชนิดที่ขึ้นอยู่กับอะตอมของสิ่งแปลกปลอมกระบวนการได้บสารเจือด้วยกระบวนการแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

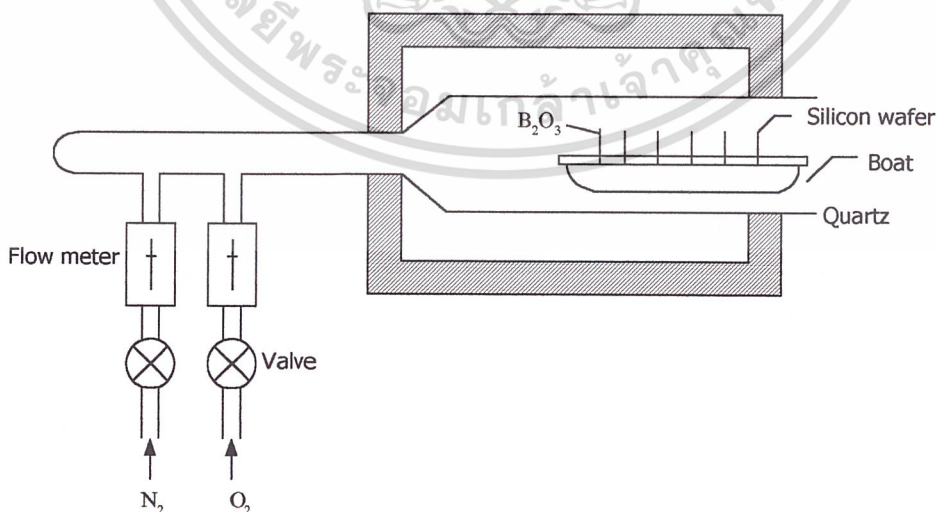
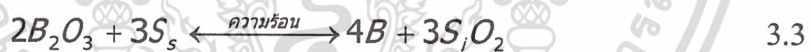
การแพร่สารเจือเป็นกระบวนการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น อีกแบบหนึ่ง โดยใช้สารเจือที่มีสภาพเป็น ไอก๊าซแพร่เข้าไปแทรกในแผ่นซิลิกอนเกิดเป็นสารกึ่งตัวนำตามชนิดของสารเจือที่นำมาแพร่ใส่ซิลิกอน นั้น ๆ ในกระบวนการแพร่มีอยู่ 2 ขั้นตอนคือ

ปรีดีโพสิชัน (Pre-deposition) เป็นกระบวนการการแพร่สารเจือขั้นต้นซึ่งจะแพร่เข้าไปในซิลิกอนเพียงชั้น ๆ เท่านั้น (ที่ผิวของซิลิกอน) แต่จะเป็นตัวกำหนดและควบคุมปริมาณสารเจือที่จะเข้าไปในแผ่นซิลิกอน

การขับลึก (Drive-in) เป็นกระบวนการการแพร่ขั้นต่อมาจากการปรีดีโพสิชัน เพื่อให้สารเจือแพร่เข้าไปในซิลิกอนให้ลึกกว่าเดิมและควบคุมลักษณะการกระจายของสารเจือที่แพร่เข้าไปในผลึกซิลิกอน

3.3.1 การแพร่สารเจือชนิดพี

ธาตุที่จะนำมาใช้เป็นสารเจือชนิดพี ที่ใช้กันคือ โบรอน (Boron) โบรอนมีสัมประสิทธิ์การแพร่ประมาณ $10^{-16} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ที่ 150°C ทำให้สามารถควบคุมการแพร่ได้สะดวก เทคนิคการแพร่สารเจือโดยใช้โบรอนทำได้ 3 แบบคือ อะตอมโบรอนแบบแข็ง คือ โบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) หรือในลักษณะของเหลวคือ โบรอนโบรไมด์ (BBr_3) ในสถานะของก๊าซคือ โบรอนไตรคลอไรด์ (BCl_3) ทั้ง 3 แบบปฏิกิริยาที่เกิดที่ผิวของซิลิกอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างโบรอนไตรออกไซด์ และซิลิกอน โดยเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้



รูปที่ 3.7 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการแพร่สารเจือชนิดพี

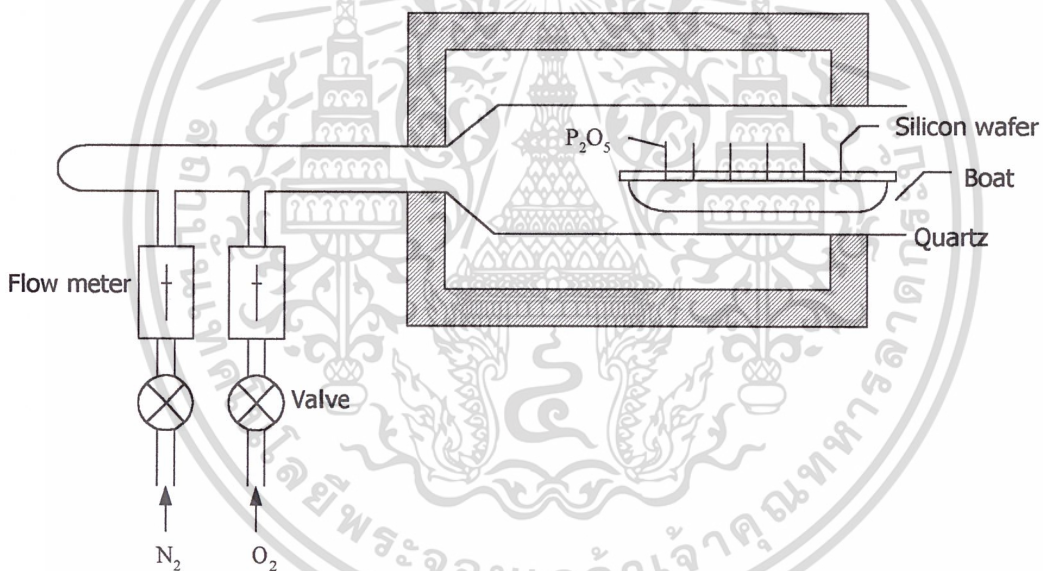
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การแพร่สารเจือชนิดอื่น

ธาตุที่นำมาใช้เป็นสารเจือชนิดอื่นที่ใช้ในที่นี้คือ ฟอสฟอรัส(Phosphorus) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ เพราะว่ามีสมบัติการแพร่สูง การแพร่ฟอสฟอรัสสามารถทำได้ 3 ลักษณะคือ ในสถานะของแข็ง ฟอสฟอรัสเพนต็อกไซด์(P_2O_5) ในลักษณะของเหลวคือ ฟอสฟอรัสออกซิคลอไรด์($POCl_3$) ในลักษณะก๊าซคือ ก๊าซฟอสฟีน(PH_3) ปฏิกิริยาซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวของซิลิกอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่าง ฟอสฟอรัสเพนต็อกไซด์(P_2O_5) และซิลิกอนทำได้โดยการแยกตัวของฟอสฟอรัสออกจาก P_2O_5 ที่ผิวของซิลิกอนเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้



จากนั้นฟอสฟอรัสจึงแพร่เข้าไปในเนื้อซิลิกอนอุปกรณ์ที่ใช้ในการแพร่ฟอสฟอรัสแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการแพร่สารเจือชนิดอื่น

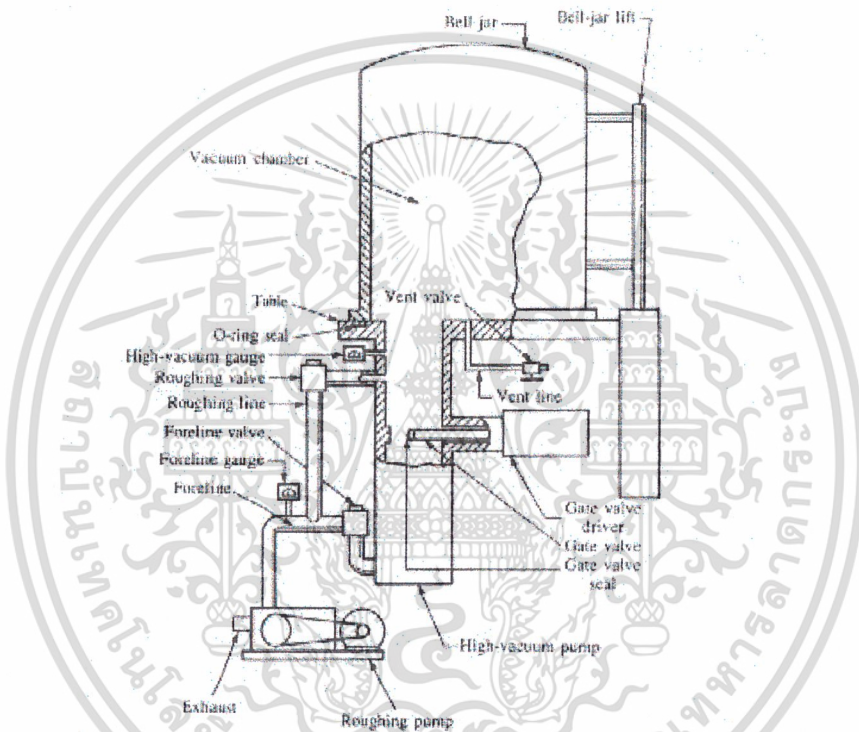
3.4 กระบวนการเมทัลไลเซชัน(metallization)ด้วยการทำอีวาโปเลชัน (Evaporation process)

กระบวนการเมทัลไลเซชันคือ กระบวนการสร้างชั้น โลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับ ขั้วไฟฟ้าหรือแถบตัวนำเชื่อมต่อภายในหน้าที่ของมันเป็นขั้วสัมผัส(Metal contact) ของส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งในที่นี้จะใช้กระบวนการที่เรียกว่า กระบวนการอีวาโปเลชัน โดยเป็นวิธีการที่ใช้กันมานานแล้วในการเคลือบ โลหะเป็นฟิล์ม โดยให้ความร้อนแก่ลูมิเนียมจนระเหยกลายเป็นไอจนไปเคลือบที่แผ่นซิลิกอนเป็นฟิล์มบางๆ โดยจะมีชั้นตอนคร่าวๆดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. นำแผ่นซิลิกอนที่ทำความสะอาดแล้วใส่เข้าไปในครอบแก้วสุญญากาศที่ดูอากาศได้ค่าความดันตามต้องการแล้ว

2. นำลูมิเนียมวางลงบนเส้นลวดความร้อนซึ่งอาจเป็นลวดทังสเตนเรียกว่า โบริต (Boat) แล้วปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจนลูมิเนียมระเหยกลายเป็นไอกระจายไปทั่วจนเคลือบที่แผ่นซิลิกอน

3. เมื่อทำการเคลือบได้ความหนาตามต้องการแล้วซึ่งคิดตามเวลาและความดันภายในแคลมเบอร์ (Chamber) โดยสามารถควบคุมได้โดยการเติมก๊าซไนโตรเจนเหลวเพื่อควบคุมสภาวะความร้อน

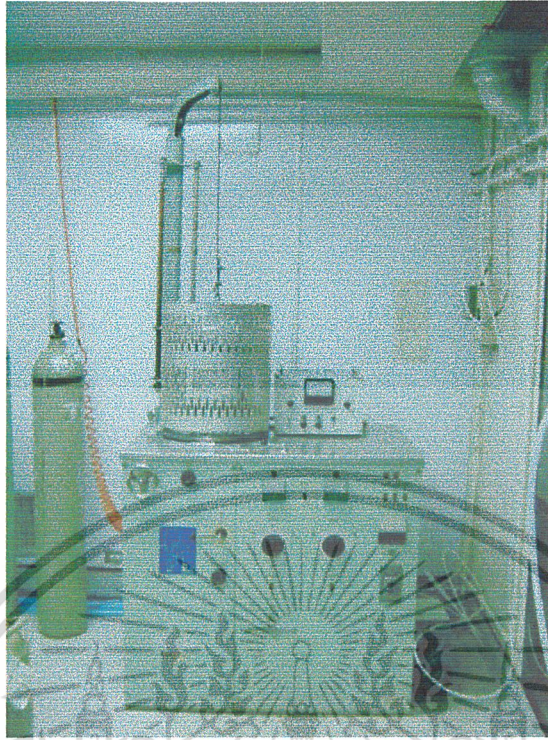


รูปที่ 3.9 แสดงหลอดสุญญากาศที่ใช้ในกระบวนการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (Evaporation)

ซึ่งประกอบด้วย Vacuum Chamber, roughing pump, high-vacuum pump,

และ various valve and vacuum gauges

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (Evapolution)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบโครงสร้างเมกนีโททรานซิสเตอร์

จากทฤษฎีของเมกนีโททรานซิสเตอร์ คือการใช้หลักการไบอัสทรานซิสเตอร์ด้วยแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง โดยใช้หลักการฉีดของประจุพาหะในส่วนที่เป็นเบสและนำไปประยุกต์ใช้กับการตรวจจับ สัญญาณแม่เหล็กโดยให้เส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านแล้ววัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเลกเตอร์

โครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ตรวจสอบสัญญาณแม่เหล็กสามารถแบ่งได้ 2 แบบคือ ทรานซิสเตอร์เซ็นเซอร์แม่เหล็กตามแนวตั้ง โดยอาศัยการไหลของพาหะแม่เหล็กในแนวตั้ง และ ทรานซิสเตอร์เซ็นเซอร์แม่เหล็กตามขวาง โดยอาศัยการไหลของพาหะในแนวตั้งและแนวขวางตามลำดับ ในการตอบสนองจะใช้หลักการของแรงลอเรนซ์ในการไหลของพาหะ ดังสมการ

$$F = qV \times B \quad 4.1$$

และปฏิกิริยารวมตัวกันของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า

$$B = \mu_0 (H + M) \quad 4.2$$

โดย

$B =$ คือความหนาของเส้นแรงแม่เหล็ก

$H =$ คือความเข้มขั้วของสนามแม่เหล็ก

$M =$ คือ Magnetization

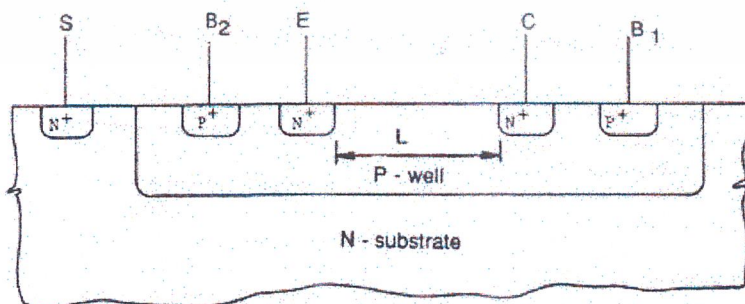
$\mu_0 =$ คือ permeability ของสุญญากาศ

และในวัสดุที่ไม่เป็นแม่เหล็ก เช่น ซิลิกอน จะมี $M = 0$

จะได้

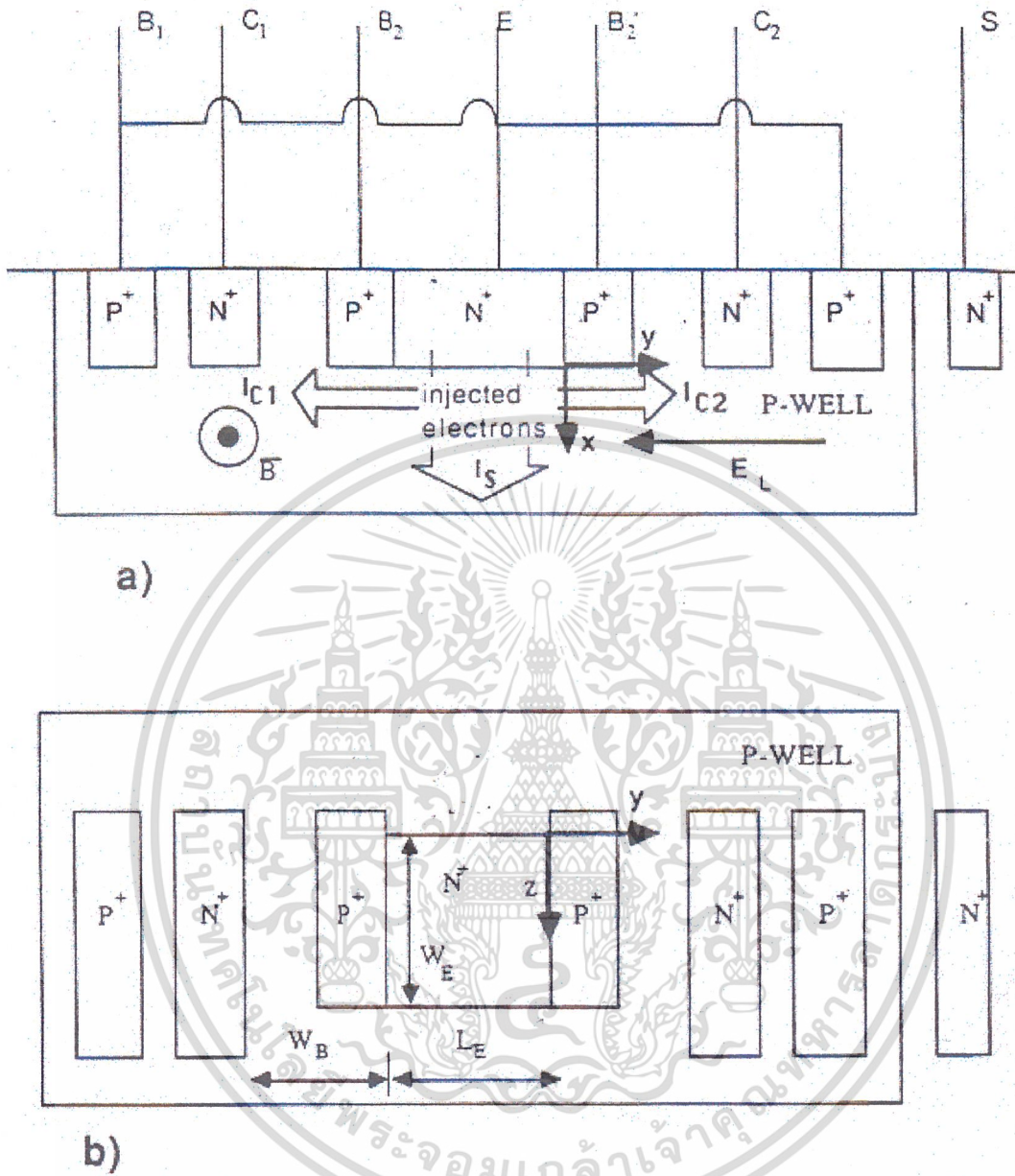
$$B = \mu_0 H \quad 4.3$$

โครงสร้างของเมกนีโททรานซิสเตอร์ตามขวางสามารถออกแบบได้หลายแบบดังตัวอย่างภาพดังนี้



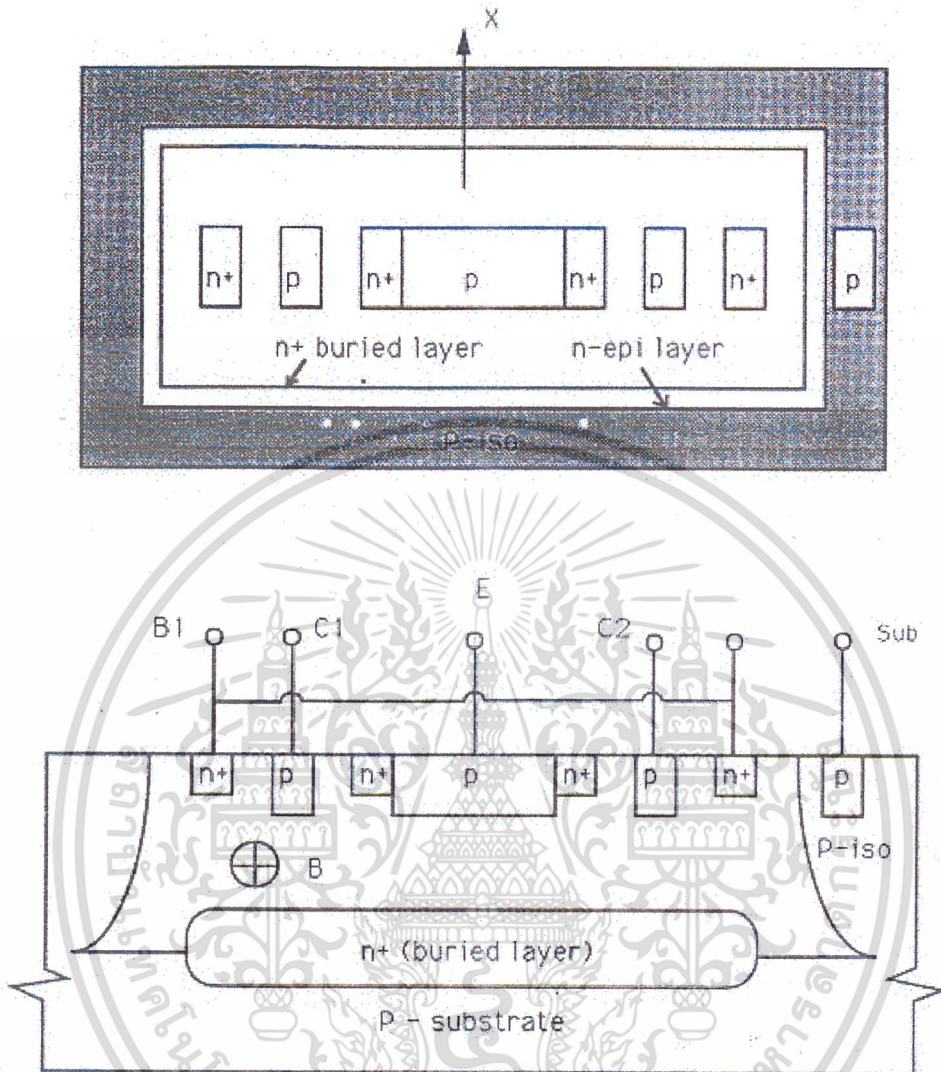
รูปที่ 4.1 แสดง n-p-n เมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดตามขวางใน CMOS เทคโนโลยี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



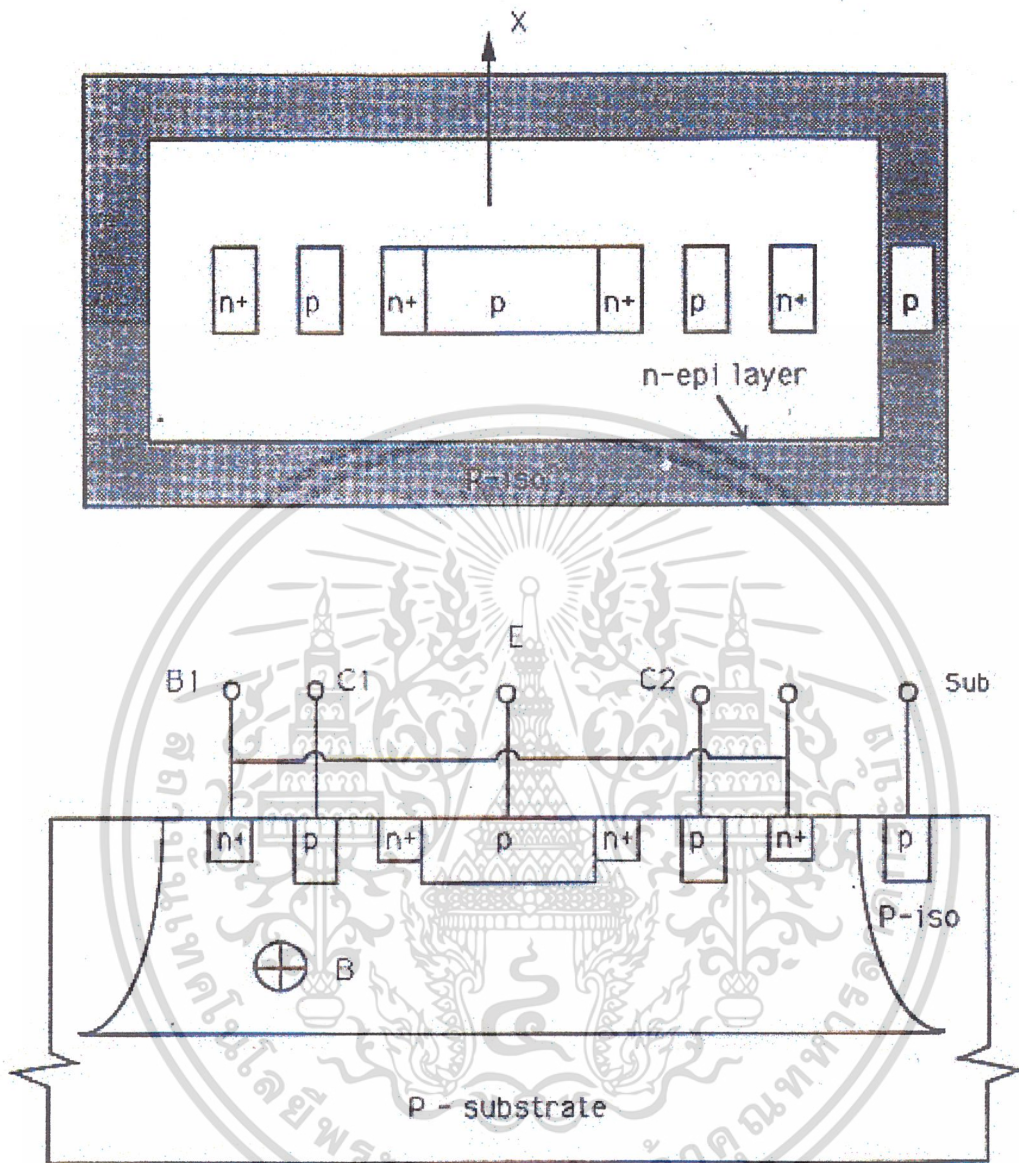
รูปที่ 4.2 แสดง n-p-n แมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดตามขวางแบบมีไซด์เวล ใน CMOS เทคโนโลยี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



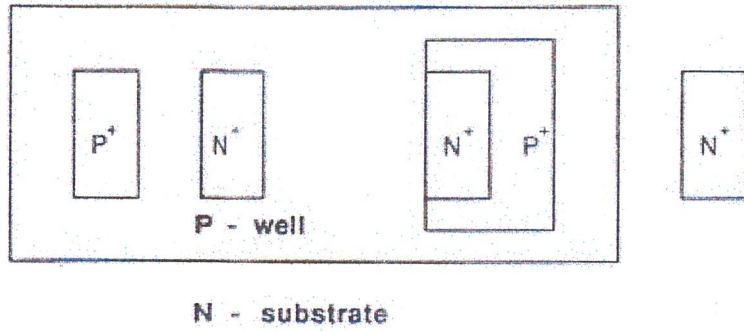
รูปที่ 4.3 แสดง n-p-n แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดตามขวางแบบมีชั้นอิพิทาซีในไบโพลาร์เทคโนโลยี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

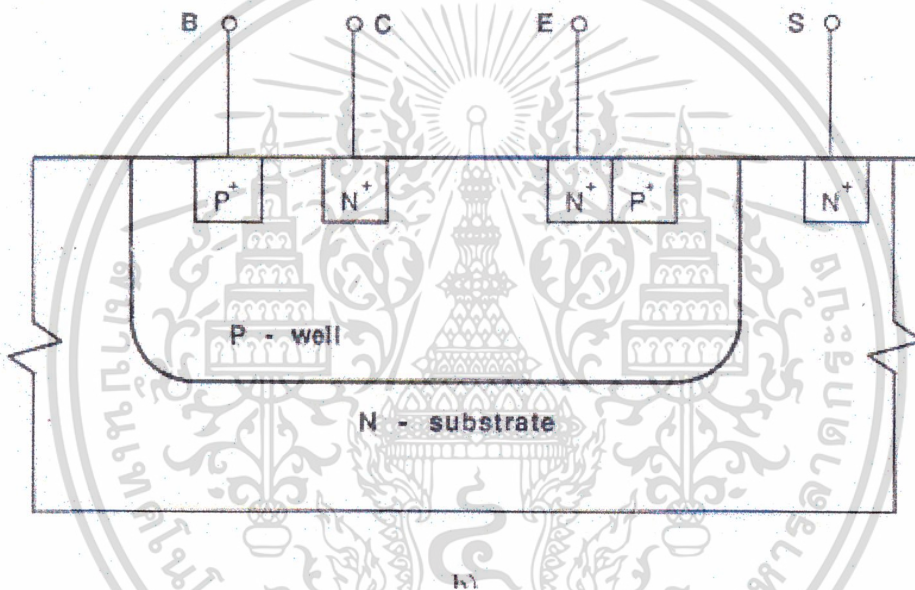


รูปที่ 4.4 แสดง n-p-n แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดตามขวาง
แบบไม่มีชั้นอิพิทาคซีในไบโพลาร์เทคโนโลยี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

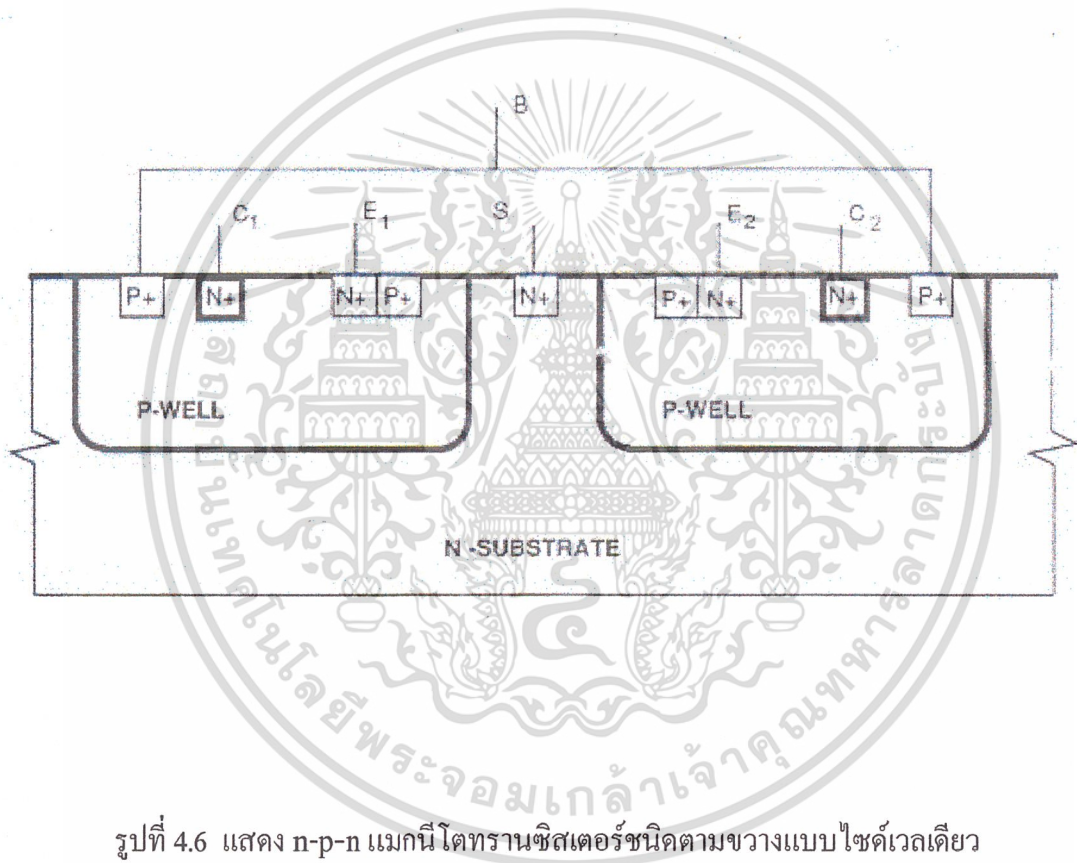
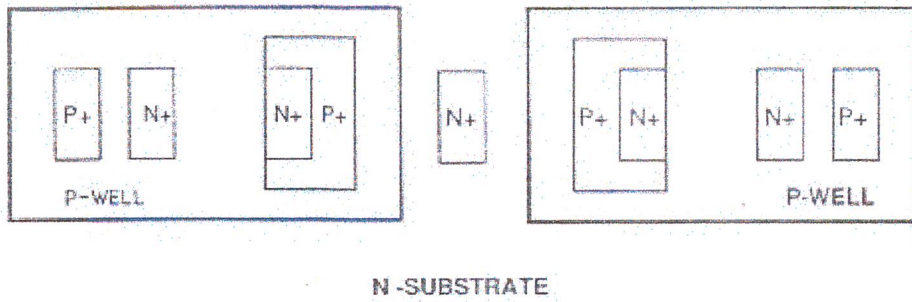


a)



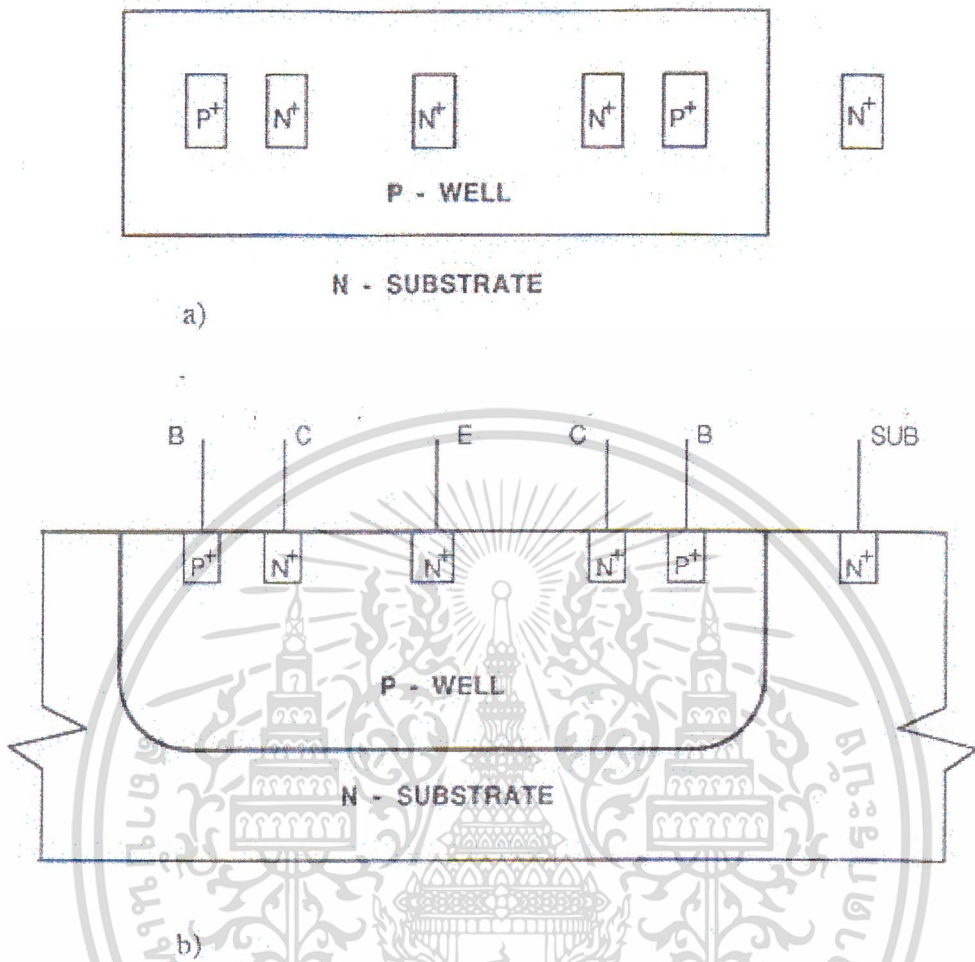
รูปที่ 4.5 แสดง n-p-n แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดตามขวางแบบไซด์เวลดียวใน CMOS เทคโนโลยี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดง n-p-n แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดตามขวางแบบไซด์เวลเดียว
แบบสมมาตรใน CMOS เทคโนโลยี

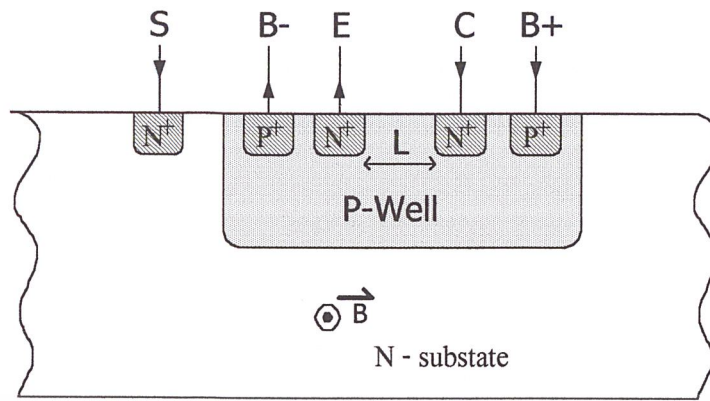
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



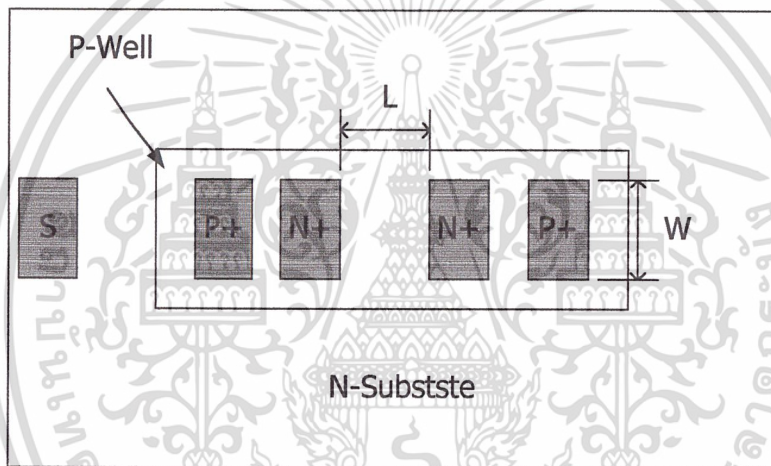
รูปที่ 4.7 แสดง n-p-n แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดตามขวางแบบสมมาตรใน CMOS เทคโนโลยี

แบบที่โครงการนี้เลือกใช้ทำการทดลองจะเป็นโครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิด n-p-n แมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดตามขวางใน CMOS เทคโนโลยี ดังรูปตัวอย่างที่ 4.1 ด้วยเหตุผลที่ว่ามีความสะดวกในการสร้างและการทดลองไบอัส จะมีลักษณะของภาพตัดขวางดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

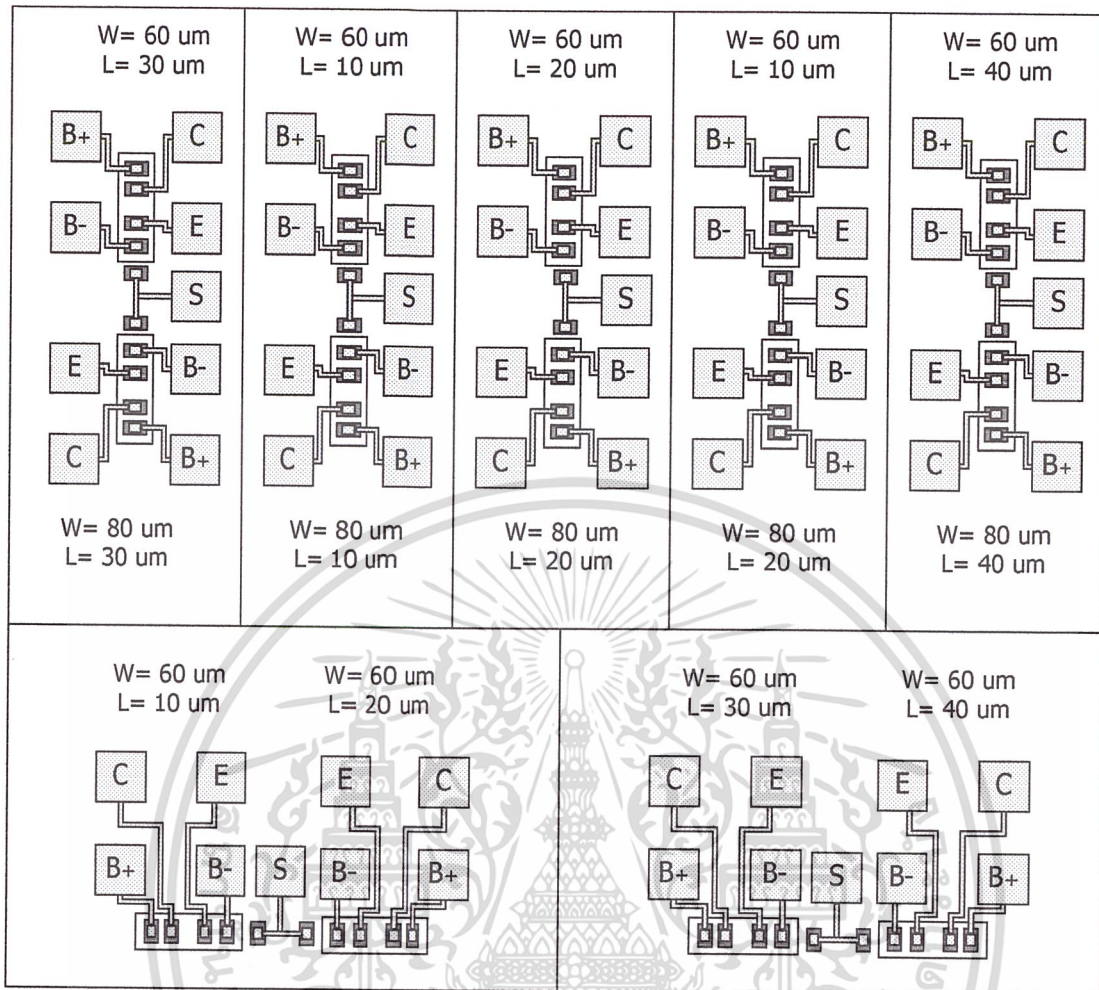


รูปที่ 4.8 แสดงภาพตัดขวางของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่ออกแบบเพื่อทดลอง

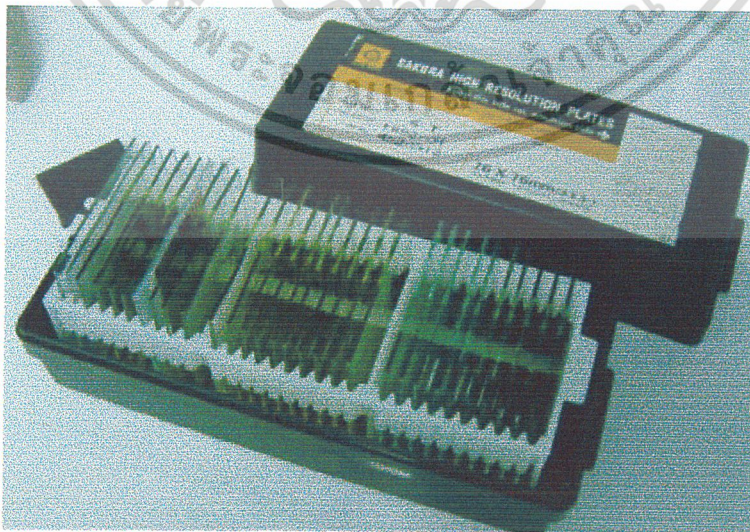


รูปที่ 4.9 แสดงภาพด้านบนของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีความยาว L และกว้าง W

การทดลองจะทำการออกแบบให้มีขนาดความยาว L และกว้าง W ที่แตกต่างกันไปดังแผนภาพ
 ทั้งนี้เพื่อการทดสอบหาความเป็นไปได้ที่ว่าขนาดแตกต่างกันมีความสามารถในการเซนส์ที่ต่างกันเพื่อหา
 ตัวทรานซิสเตอร์ที่เหมาะสมในการใช้งานต่อไป



รูปที่ 4.10 แสดงแผนภาพการวางตั้งอุปกรณ์ในการสร้างลงบนแผ่นซิลิกอน



รูปที่ 4.11 แสดงกล่องใส่กระจกมาสก์หลังกระบวนการออกแบบที่พร้อมใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ขั้นตอนการสร้างเมกนีโททรานซิสเตอร์ด้วยเทคโนโลยี ซีมอส

ในกระบวนการสร้างเมกนีโททรานซิสเตอร์จะเป็นวิธีการทำโดยใช้การสร้างแบบซีมอส ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมีวิธีการหลักๆ เช่น โฟโตลิโทกราฟี ออกซิเดชัน การแพร่สารเจือด้วยความร้อน การทำอีวาโปเลชัน การทำซินเตอร์ริง เป็นต้น โดยลำดับขั้นตอนการสร้างจะมีวิธีการดังต่อไปนี้

1. ทำการเตรียมแผ่นซิลิกอนและตรวจสอบคุณสมบัติ

แผ่นซิลิกอนชนิด n มีระนาบ (111)

พิกัดความต้านทาน 2-5 Ω -cm

ความหนา 400 μ m

2. ทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิกอนครั้งแรกโดย

2.1 Ultrasonic ในน้ำบริสุทธิ์ (Deionized Water) 2 นาที

2.2 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์

2.3 ต้มในกรด HNO_3 10 นาที

2.4 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์

2.5 ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที

2.6 ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที

2.7 เป่าแห้งด้วย N_2 (ไนโตรเจน)

3. ทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นมาตรฐาน

3.1 ต้มใน Trichoeethylene 5 นาที

3.2 Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที

3.3 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง

3.4 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง

3.5 เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน N_2

4. การ Slice etching

4.1 จุ่มในสารละลาย HF 5 % 10 วินาที

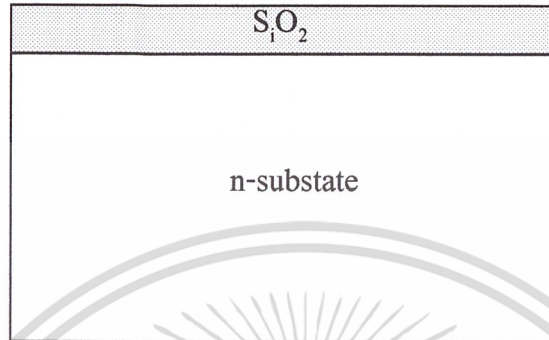
4.2 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 1 และ 2

4.3 เป่าแห้งด้วย N_2

5. กระบวนการออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิ 1150 องศา อุณหภูมิน้ำ 90 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

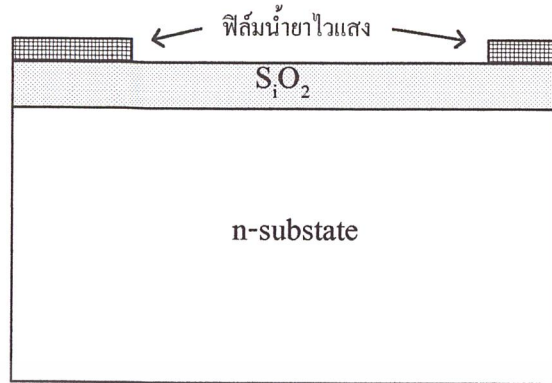
- 5.1 Dry oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min 3 ชั่วโมง
- 5.2 Wet oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min 1.4 ชั่วโมง
- 5.3 Dry oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min 2 ชั่วโมง



รูปที่ 5.1 แสดงแผ่นซิลิกอนที่สร้างออกไซด์แล้ว

6. ทำกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาร์กที่ 1 (เพื่อทำ P well)

- 6.1 อบแผ่นไล่ความชื้นที่ $120^{\circ}C$ 30 นาที
- 6.2 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ spin 5000 rpm
- 6.3 อบฟิล์มที่ $95^{\circ}C$ นาน 30 นาที
- 6.4 Aligment Expose
- 6.5 Develop ฟิล์ม โดย
 - 6.5.1 จุ่มใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที
 - 6.5.2 จุ่มใน Xylene แก้วที่สอง 90 วินาที
 - 6.5.3 จุ่มใน Isopropyl Alcohol แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
 - 6.5.4 จุ่มใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สอง 30 วินาที
 - 6.5.5 จุ่มใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สาม 30 วินาที
 - 6.5.6 จุ่มน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่งและสอง
 - 6.5.7 เป่าแห้งด้วย N_2



รูปที่ 5.2 แสดงการถ่ายภาพมาร์กเพื่อสกัดชั้นออกไซด์โดยเคลือบน้ำยาไวแสงแล้ว

7. ทำความสกัดชั้นออกไซด์ออก (Oxide Etching)

- 7.1 จุ่มในสารละลาย Buffer 6 นาที
- 7.2 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง และสอง
- 7.3 เป่าแห้งด้วย N_2

8. ทำการลอกฟิล์ม

- 8.1 ต้มใน H_2SO_4 แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- 8.2 ต้มใน H_2SO_4 แก้วที่สอง 5 นาที
- 8.3 ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง และสอง อย่างละ 5 นาที
- 8.4 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- 8.5 เป่าแห้งด้วย N_2

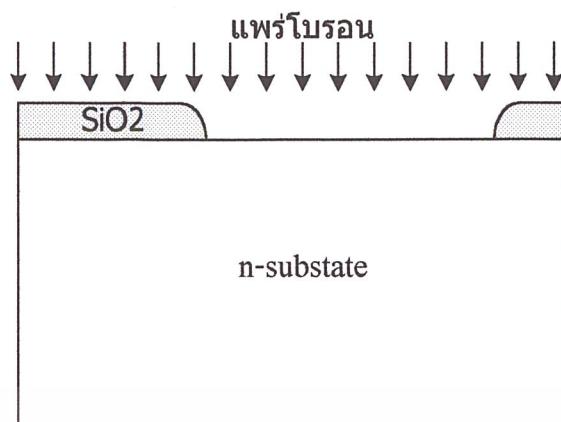
9. ทำความสะอาดผิวหน้า

- 9.1 ต้มใน Trichoethylene 5 นาที
- 9.2 Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- 9.3 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง และสอง
- 9.4 เป่าแห้งด้วย N_2

10. ทำการ Slice etching

- 10.1 จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 วินาที
- 10.2 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง และสอง
- 10.3 เป่าแห้งด้วย N_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แสดงแผ่นซิลิคอนหลังจากสกัดชั้นออกไซด์ออกแล้วทำการแพร่โบรอนเข้าไป

11. ทำการแพร่สารเจือด้วยโบรอน เพื่อสร้าง P-Well โดยใช้ Boron deposition Temp. 850°C

11.1 Activate Source ด้วย O_2 700 CC/mm 30 นาที

11.2 Stabilize Source ด้วย N_2 700 CC/mm 30 นาที

11.3 Deposit ด้วย N_2 700 CC/mm 20 นาที

11.4 สร้าง Boron glass ด้วย O_2 700 CC/mm 5 นาที

12. ทำการลอกชั้น Boron glass

12.1 จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 วินาที

12.2 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง และสอง

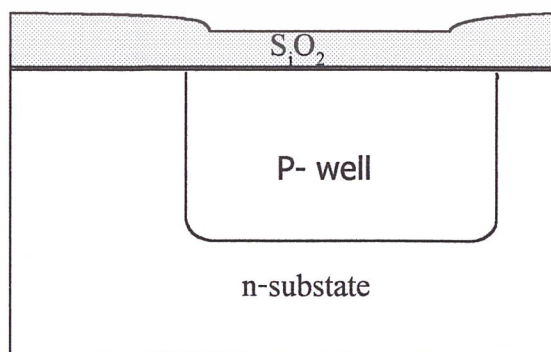
12.3 เป่าแห้งด้วย N_2

13. ทำความสะอาดผิวหน้าแบบมาตรฐาน

14. ทำการ Boron Drive in Temp. 1100°C

14.1 Dry O_2 1000 cc/min 8 ชั่วโมง

14.2 Dry N_2 1000 cc/min 12 ชั่วโมง



รูปที่ 5.4 แสดงหลังจากทำการแพร่สารเจือและทำการจับลึกลงแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ในเพื่อการศึกษาร่วมกัน ไม่อนุญาติให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. ทำโฟโตลิโทกราฟี มาร์กที่ 2 (แพร่เป็น P^+)

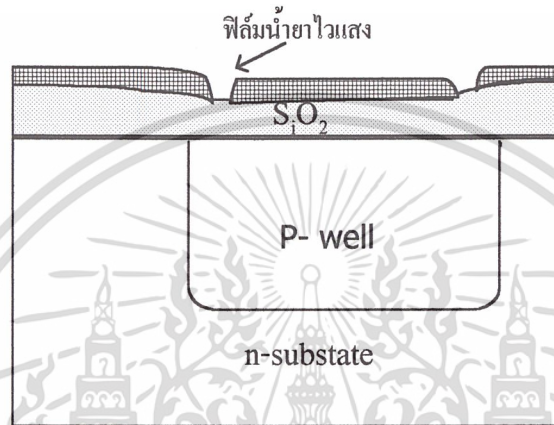
15.1 อบแผ่นไว้ด้วยความชื้น ที่ 120" นาน 30 นาที

15.2 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ Spin 5000 rpm

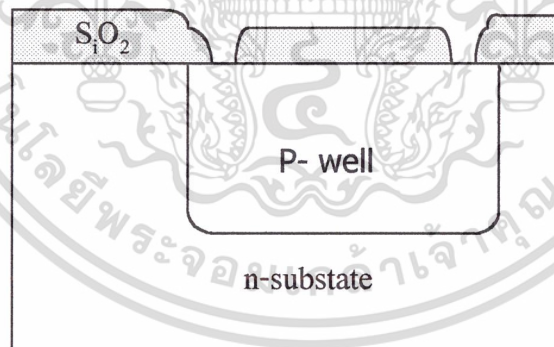
15.3 อบฟิล์มที่ 95°C นาน 30 นาที

15.4 Alignment Expose

15.5 Develop ตามกระบวนการที่ 10

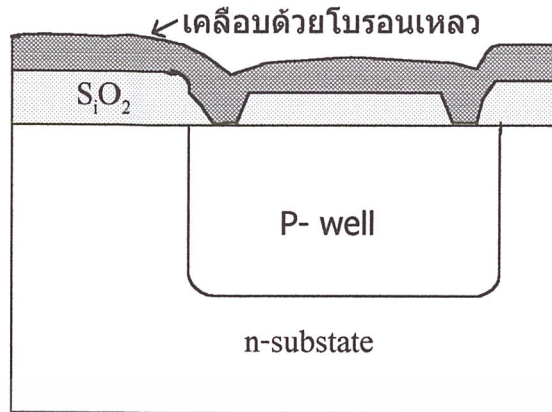


รูปที่ 5.5 แสดงโฟโตลิโทกราฟี มาร์กที่ 2 เพื่อสกัดชั้นออกไซด์ออก



รูปที่ 5.6 แสดงการสกัดชั้นออกไซด์ออกแล้วเพื่อทำการแพร่สารเจือต่อไป

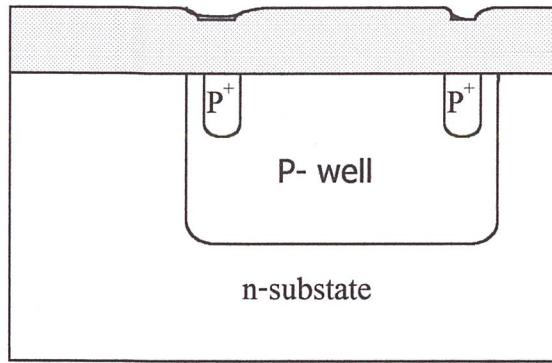
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 แสดงการเคลือบสารเจือโดยใช้โบรอนเหลว

16. ทำ Oxide Etching
17. ทำกระบวนการลอกฟิล์ม
18. ทำการทำความสะอาดผิวหน้าแบบมาตรฐาน
19. ทำการ Boron deposition ที่ Temp. 950°C
 - 19.1 เคลือบแผ่นด้วย โบรอนชนิดน้ำ แล้วสปิน 5000 รอบ/นาทีนาน 10 วินาที
 - 19.2 อบแผ่นไล่ความชื้น นาน 10 นาทีที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส
 - 19.3 Deposit ด้วย N_2 700 cc/min นาน 20 นาที
 - 19.4 สร้าง Boron glass ด้วย O_2 700 cc/min นาน 5 นาที
20. ลอกชั้น Boron glass
21. ทำความสะอาดผิวหน้าแบบมาตรฐาน
22. ทำการ Drive in Boron ด้วย Temp. 1100°C
 - 22.1 Dry O_2 1200 cc/min นาน 20 นาที
 - 22.2 Wet O_2 1200 cc/min นาน 20 นาที
 - 22.3 Dry O_2 1200 cc/min นาน 20 นาที

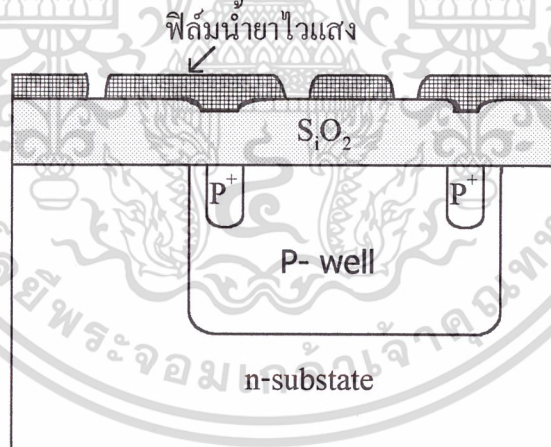
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 แสดงแผ่นซิลิคอนหลังจากขั้วลึกลับเกิดเป็น P⁺

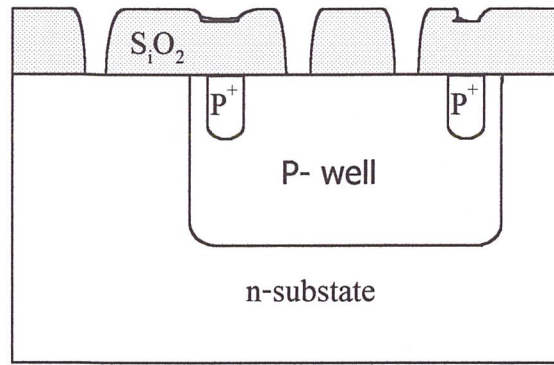
23. ทำกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาร์กที่ 3

- 23.1 อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 120°C นาน 30 นาที
- 23.2 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ spin 5000 rpm
- 23.3 อบฟิล์มที่ 95°C นาน 30 นาที
- 23.4 Alignment Expose
- 23.5 Develop Film



รูปที่ 5.9 แสดงเคลือบฟิล์ม โดยสกัดชั้นฟิล์มออกตรงบริเวณที่จะสร้างเป็นขั้ว N⁺

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 แสดงการสกัดชั้นออกไซด์ออกแล้ว

24. ทำ Oxide Etching

25. ทำกระบวนการลอกฟิล์ม

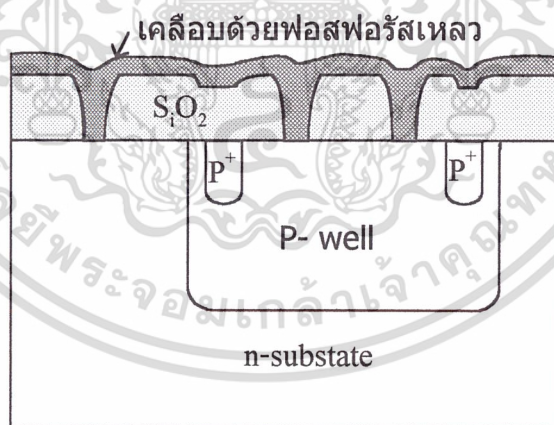
26. ทำความสะอาดผิวหน้ามาตรฐาน

27. ทำ Phosphorus Deposition Temp. 1050 °C

27.1 เคลือบแผ่นด้วยฟอสฟอรัสชนิดน้ำ แล้วสปิน 5000 รอบ/นาทีนาน 10 วินาที

27.2 อบแผ่นไล่ความชื้น นาน 10 นาทีที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

27.3 Deposit ด้วย N₂ 700 cc/min นาน 20 นาที



รูปที่ 5.11 แสดงการเคลือบสารเจือฟอสฟอรัสเหลว

28. ลอกชั้น Phosphorus glass

29. ทำความสะอาดผิวหน้ามาตรฐาน

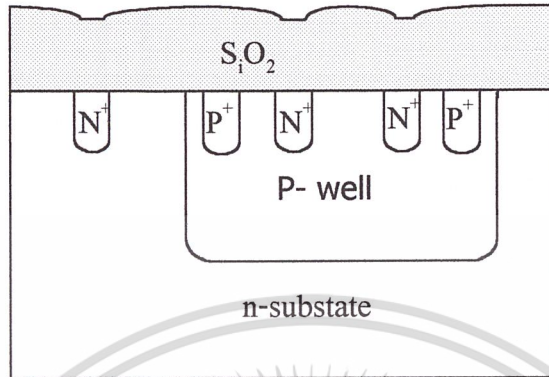
30. ทำการ Phosphorus drive in Temp. 1100 °C

30.1 Dry O₂ 1200 cc/min นาน 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30.2 Wet O_2 1200 cc/min นาน 20 นาที

30.3 Dry O_2 1200 cc/min นาน 20 นาที



รูปที่ 5.12 แสดงหลังทำการขับลึกฟอสฟอรัสเหลวที่อุณหภูมิ 1100 °C เกิดเป็นขั้ว N^+

31. ทำกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมาร์คที่ 4

31.1 อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 120 °C นาน 30 นาที

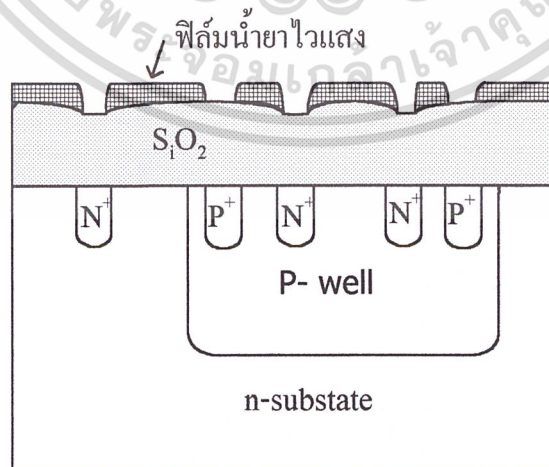
31.2 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ spin 5000 rpm

31.3 อบฟิล์มที่ 95 °C นาน 30 นาที

31.4 Alignment Expose

31.5 Develop Film

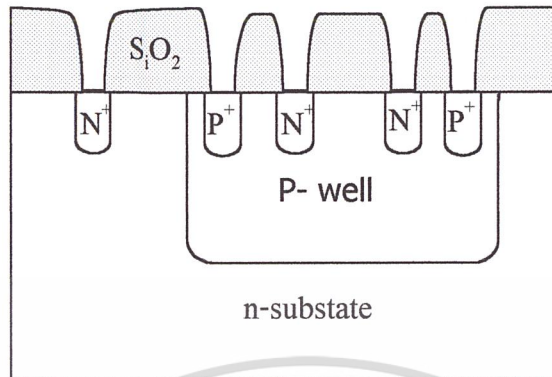
32. ทำ Oxide Etching



รูปที่ 5.13 แสดงการเปิดมาร์กคอนเทคโดยเคลือบน้ำยาไวแสง

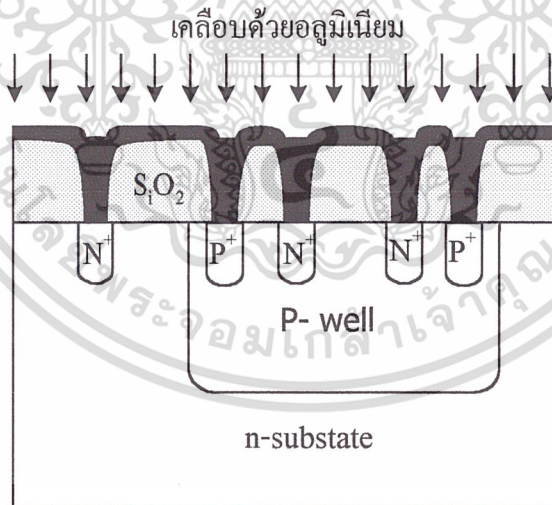
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วถ่ายมาร์กพร้อมทั้งสกัดชั้นน้ำยาไวแสง



รูปที่ 5.14 แสดงการสกัดชั้นออกไซด์ออกแล้วเพื่อทำการเคลือบอลูมิเนียมต่อไป

33. ทำกระบวนการลอกฟิล์ม
34. ทำความสะอาดผิวหน้ามาตรฐาน
35. ทำการเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator ที่ความดัน 2×10^{-6} Torr



รูปที่ 5.15 แสดงการเคลือบด้วยอลูมิเนียมด้วยวิธีการอีวาโปเลท

36. ทำกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมาร์คที่ 5
 - 36.1อบแผ่นไต่ความชื้นที่ 120°C นาน 30 นาที
 - 36.2 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก spin 5000 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

36.3 อบฟิล์มที่ 85°C นาน 20 นาที

36.4 Alignment Expose

36.5 Develop Film

37. ทำการกัดชั้นอลูมิเนียม (Al- Etching)

37.1 จุ่มสารละลาย Al-Etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40°C

37.2 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 1 และ 2 และเป่าแห้งด้วย N_2

38. ทำกระบวนการลอกฟิล์ม

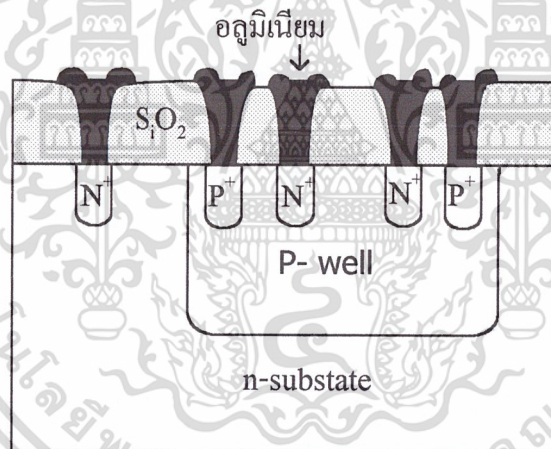
38.1 จุ่มลงใน Acetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที

38.2 จุ่มลงใน Acetone แก้วที่สอง 1 นาที

38.3 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 1 และ 2 และเป่าแห้งด้วย N_2

39. ทำการ Sintering Temp. 500°C

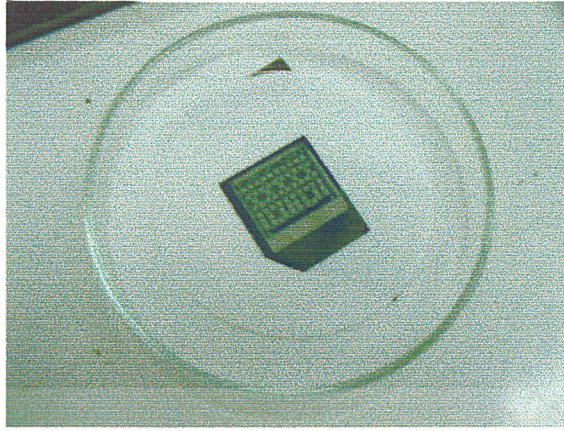
39.1 Dry N_2 1000 cc/min นาน 12 นาที



รูปที่ 5.16 แสดงการสกัดชั้นอลูมิเนียมทำเป็นขั้วต่อ

40. ได้ชิ้นงานที่สำเร็จนำไปทำการทดสอบวิเคราะห์คุณสมบัติต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 แสดงรูปชิ้นงาน แมกนีโตทรานซิสเตอร์ตามขวางที่สร้างขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

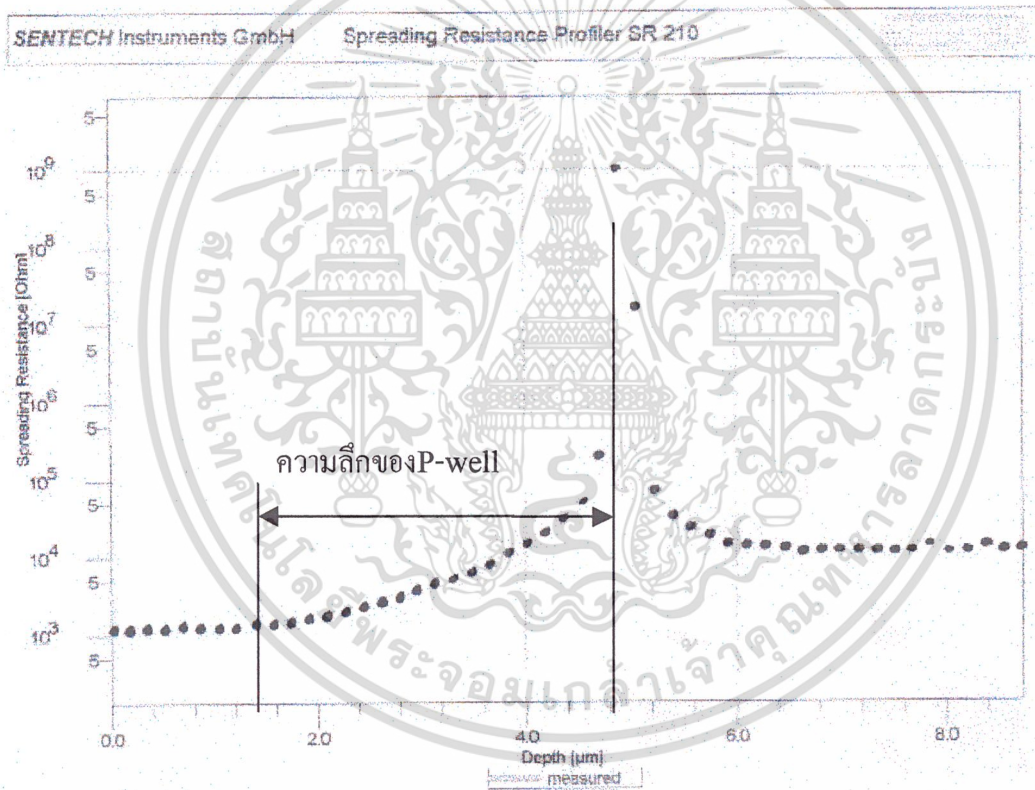
บทที่ 6

การวัดคุณสมบัติของเมกนีโตทรานซิสเตอร์

การวัดและทดสอบคุณสมบัติของเมกนีโตทรานซิสเตอร์ จะมีวิธีการต่างๆ ดังต่อไปนี้

6.1 วัดความลึก ของ P-well

การวัดความลึกของหลุมพีเวลด จะใช้วิธีการขัดแผ่นออกเป็นลักษณะเฉียงแล้ววัดโดยใช้เครื่อง Spreading resistance profile SR210 ซึ่งจะปรากฏผลดังในกราฟรูปที่ 6.1 โดยจากกราฟจะเห็นความแตกต่างของความต้านทานตั้งแต่เมื่อเริ่มวัดจนความต้านทานเปลี่ยนไปทำให้ทราบว่าความลึกของพีเวลดมีค่าประมาณ 4 ไมครอนนั่นเอง

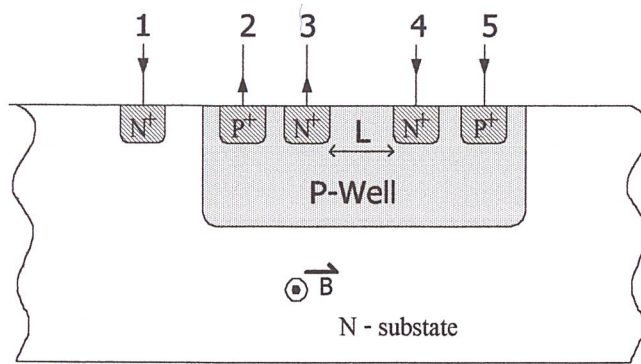


รูปที่ 6.1 กราฟแสดงผลการวัดระดับความลึกของ P-Well

6.2 วัดคุณสมบัติของรอยต่อ P-N ของ เมกนีโตทรานซิสเตอร์

การทำการวัดคุณสมบัติของรอยต่อของเมกนีโตทรานซิสเตอร์ จะทำเพื่อทดสอบว่าทรานซิสเตอร์ที่สร้างขึ้นใช้ได้หรือไม่ ซึ่งเป็นการวัดและทดสอบคุณสมบัติการเกิดเป็นรอยต่อทุกๆรอยต่อ โดยการวัดรอยต่อด้วยเครื่อง Transistor-Curve Tracer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

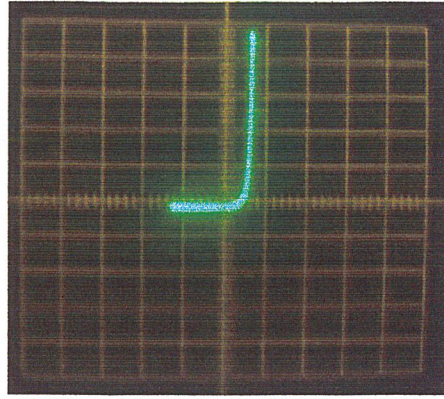


รูปที่ 6.2 แสดงโครงสร้างของเมกนีโตทรานซิสเตอร์สำหรับวัดรอยต่อ

1. คุณสมบัติของรอยต่อที่ควรจะเป็นไปตามทฤษฎี

- รอยต่อขั้ว 1-2 มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อพี-เอ็น กราฟเป็นลักษณะของการให้ไบอัสกับไดโอดนั่นเอง
- รอยต่อขั้ว 1-3 มีชั้น P-well ชั้นอยู่ระหว่างพี กับ เอ็นทำให้ไม่ต่อดึงกัน กราฟจึงมีลักษณะเป็นเส้นตรงไม่ขึ้นกับแรงดันที่ป้อนให้
- รอยต่อขั้ว 1-4 จะเป็นลักษณะเช่นเดียวกับรอยต่อขั้ว 1-3
- รอยต่อขั้ว 1-5 มีคุณสมบัติและกราฟเหมือนกันกับรอยต่อขั้ว 1-2
- รอยต่อขั้ว 2-3 มีคุณสมบัติและกราฟเหมือนกันกับรอยต่อขั้ว 1-2
- รอยต่อขั้ว 2-4 มีคุณสมบัติและกราฟเหมือนกันกับรอยต่อขั้ว 1-2
- รอยต่อขั้ว 2-5 มีคุณสมบัติเป็นความต้านทาน กราฟจะมีลักษณะเป็นลิเนียร์
- รอยต่อขั้ว 3-4 มีชั้น P-well ชั้นอยู่ระหว่างขั้วทั้งสองทำให้ไม่ต่อดึงกัน กราฟจึงมีลักษณะเป็นเส้นตรง
- รอยต่อขั้ว 4-5 มีคุณสมบัติและกราฟเหมือนกันกับรอยต่อขั้ว 1-2

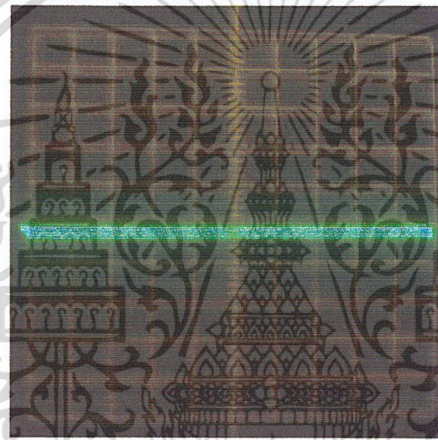
2. กราฟแสดงผลการวัดรอยต่อพีเอ็นของทรานซิสเตอร์สร้างขึ้นด้วยเครื่องเทรเซอร์ (Transistor Curve Tracer) ซึ่งสามารถเปรียบเทียบว่ารอยต่อเป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่ตามข้างต้นที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 1



Ver(I) = 0.1mA/div

Hor(V) = 1V/div

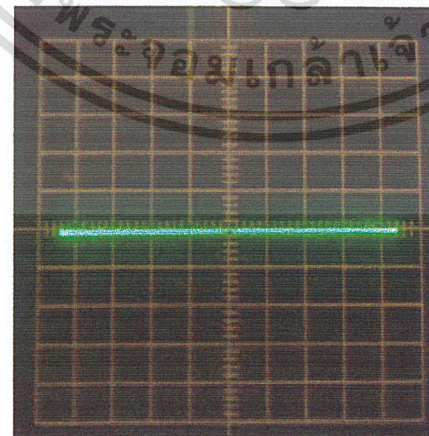
รูปที่ 6.3 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-2



Ver(I) = 0.1mA/div

Hor(V) = 1V/div

รูปที่ 6.4 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-3

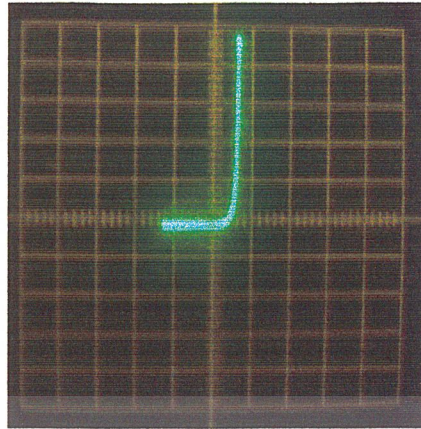


Ver(I) = 0.1mA/div

Hor(V) = 1V/div

รูปที่ 6.5 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-4

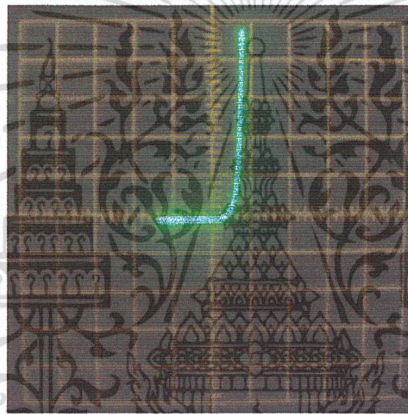
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$\text{Ver(I)} = 0.1\text{mA/div}$$

$$\text{Hor(V)} = 1\text{V/div}$$

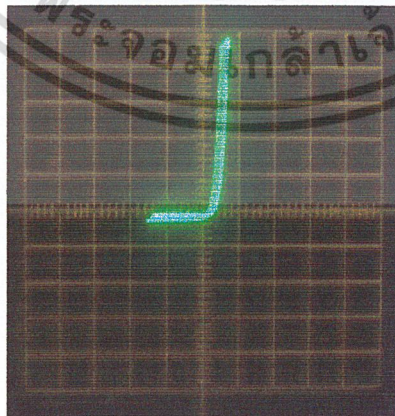
รูปที่ 6.6 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-5



$$\text{Ver(I)} = 0.1\text{mA/div}$$

$$\text{Hor(V)} = 1\text{V/div}$$

รูปที่ 6.7 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 2-3

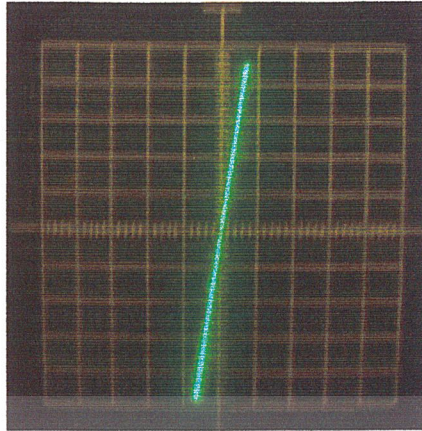


$$\text{Ver(I)} = 0.1\text{mA/div}$$

$$\text{Hor(V)} = 1\text{V/div}$$

รูปที่ 6.8 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 2-4

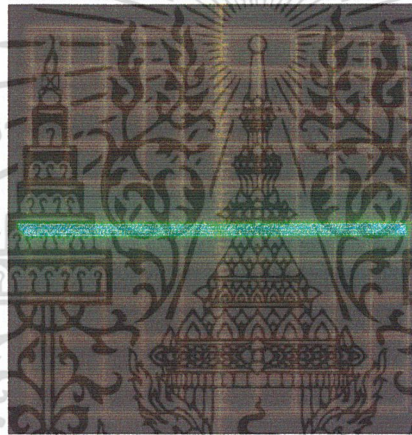
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$\text{Ver}(I) = 0.1\text{mA/div}$$

$$\text{Hor}(V) = 1\text{V/div}$$

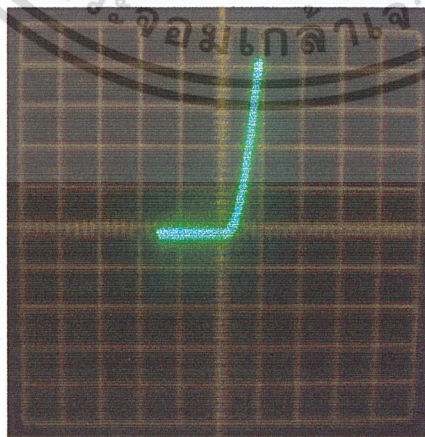
รูปที่ 6.9 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นในช่วงที่ 2-5



$$\text{Ver}(I) = 0.1\text{mA/div}$$

$$\text{Hor}(V) = 1\text{V/div}$$

รูปที่ 6.10 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นในช่วงที่ 3-4

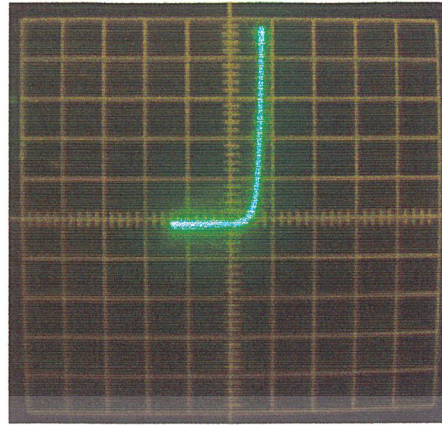


$$\text{Ver}(I) = 0.1\text{mA/div}$$

$$\text{Hor}(V) = 1\text{V/div}$$

รูปที่ 6.11 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นในช่วงที่ 3-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



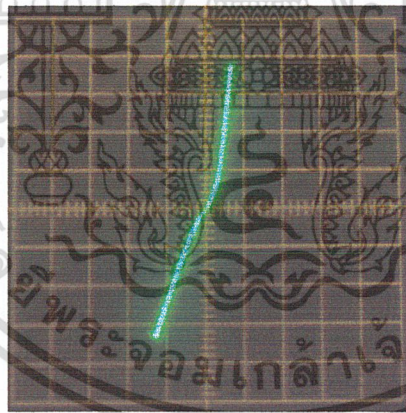
Ver(I) = 0.1mA/div

Hor(V) = 1V/div

รูปที่ 6.12 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นจังก์ชันที่ 4-5

3. รอยต่อที่มีคุณสมบัติไม่เป็นไปตามคุณสมบัติที่ต้องการ

รอยต่อที่ไม่เป็นไปตามคุณสมบัติที่ต้องการคือรอยต่อที่มีกระแสรั่วมากเกินไปหรือรอยต่อที่ควรจะขาดจากกันแต่กลับมีคุณสมบัติเป็นรอยต่อพีเอ็นแทน ทำให้คุณสมบัติไม่เข้าไปตามที่ต้องการ ตัวอย่างดังรูปที่ 6.12 และ 6.13

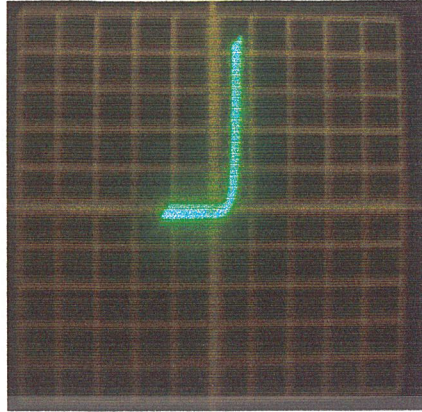


Ver(I) = 0.1mA/div

Hor(V) = 1V/div

รูปที่ 6.13 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นจังก์ชันที่ 4-5 ที่มีกระแสรั่วมากเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



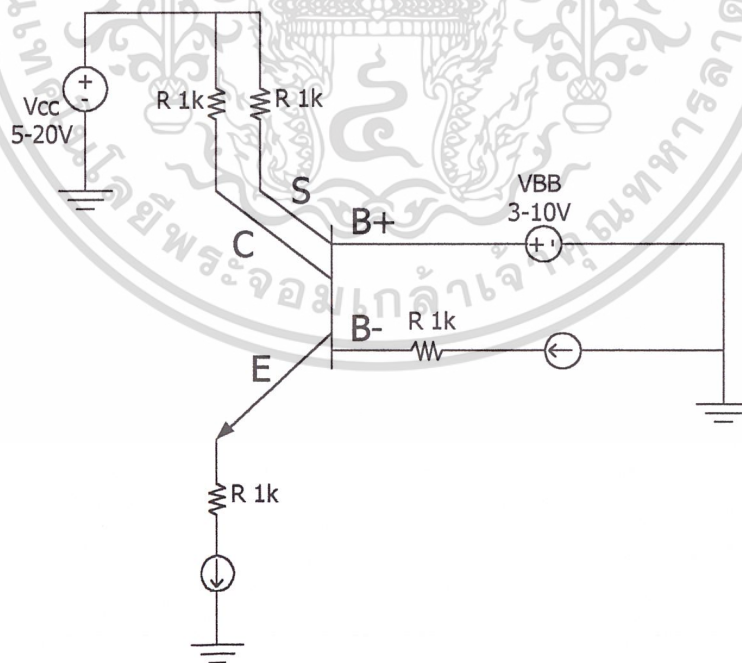
$$\text{Ver}(I) = 0.1\text{mA/div}$$

$$\text{Hor}(V) = 1\text{V/div}$$

รูปที่ 6.14 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-3 ที่เป็นรอยต่อพีเอ็นแทน

6.3 ผลการวัดการไบอัสไฟฟ้ากระแสตรง

ซึ่งวิธีการวัดจะไบอัสด้วยแหล่งจ่ายกระแสตรงดังรูปที่ 6.15 แล้วบันทึกผลการทดลองโดยตั้งค่ากระแส I_B ให้มีค่าคงที่ตั้งแต่ 0.2 – 0.8 mA แล้วเปลี่ยนค่ากระแส I_E ตั้งแต่ 0.2-0.8 mA ไปเรื่อยๆ บันทึกผลของกระแส I_C เช่น ตั้งค่า I_B ไว้ที่ 0.2 mA แล้วเปลี่ยนค่า I_E ตั้งแต่ 0.2-0.8 mA บันทึกผลของกระแส I_C จากนั้นจึงเปลี่ยนค่า I_B เป็น 0.4 mA ทำซ้ำไปเรื่อยๆ ดังแสดงในภาคผนวก ก

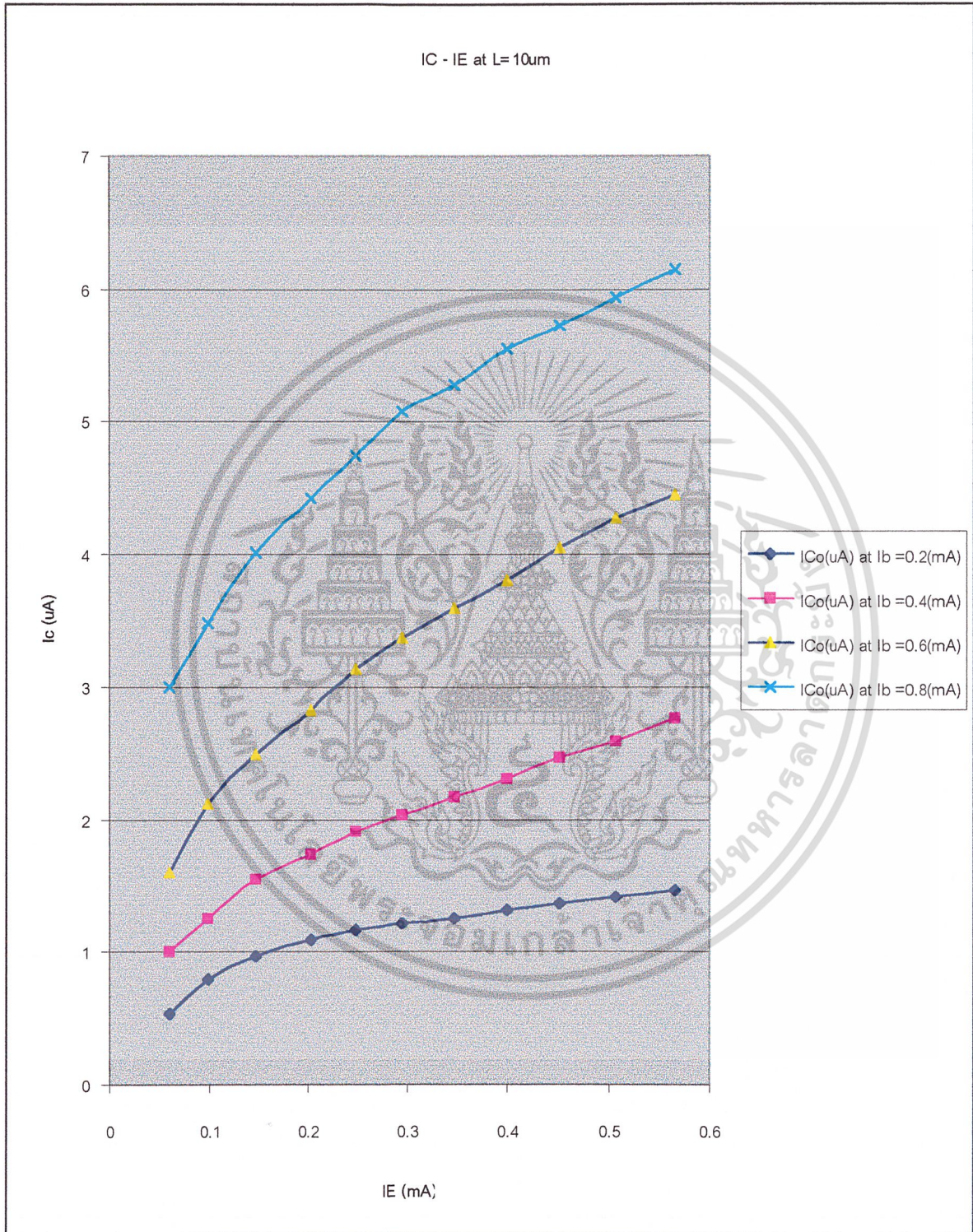


รูปที่ 6.15 แสดงวงจรการให้ไบอัสทรานซิสเตอร์แบบฟอร์เวิร์ดแอกทีฟโหมด

ควบคุมกระแสด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่

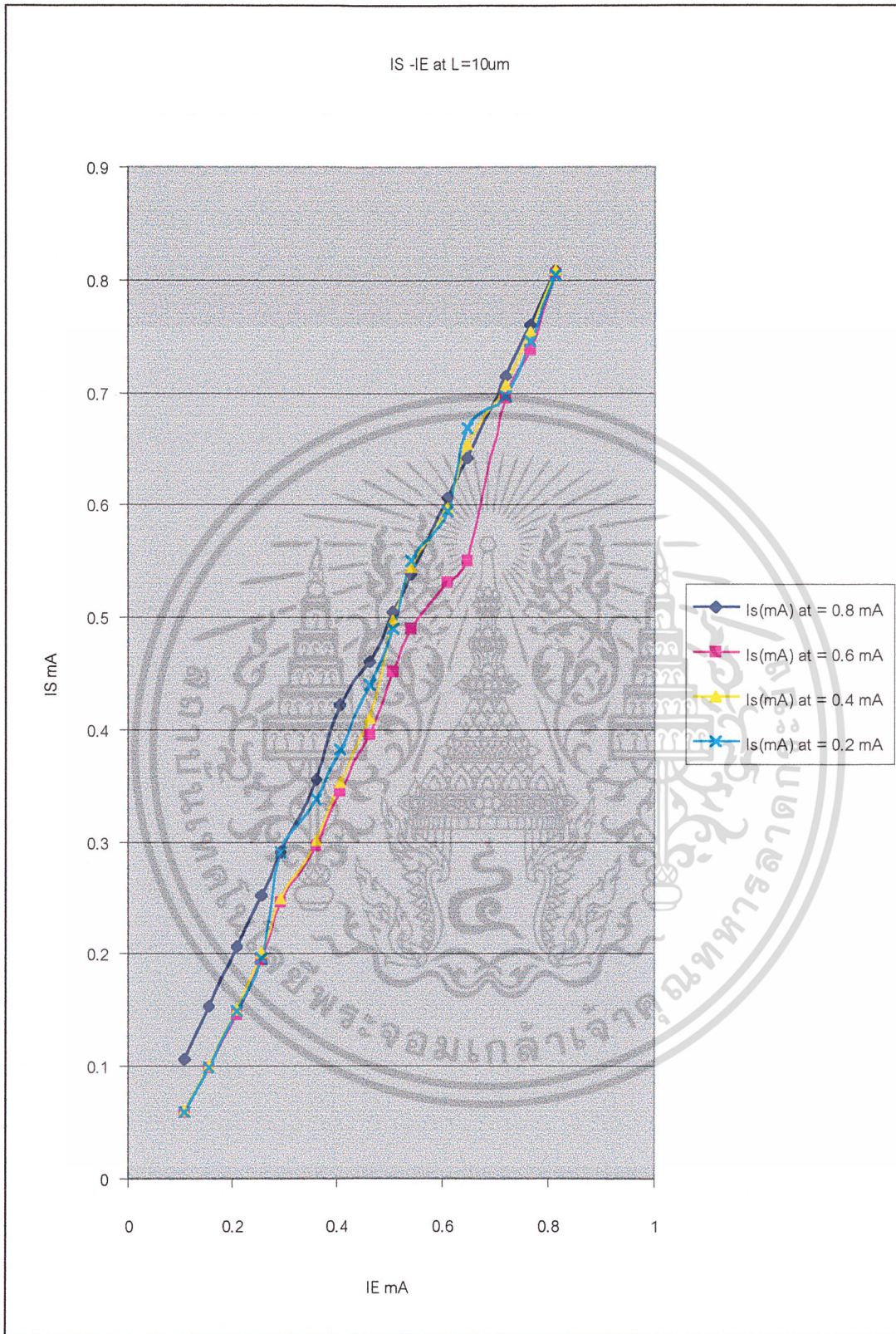
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งวิธีการวัดแสดงไว้ในภาคผนวก ข และ ค โดยค่าที่ได้จากการวัดแสดงไว้ในภาคผนวก ก แล้วนำผลการทดลองมาพล็อตกราฟได้ดังนี้



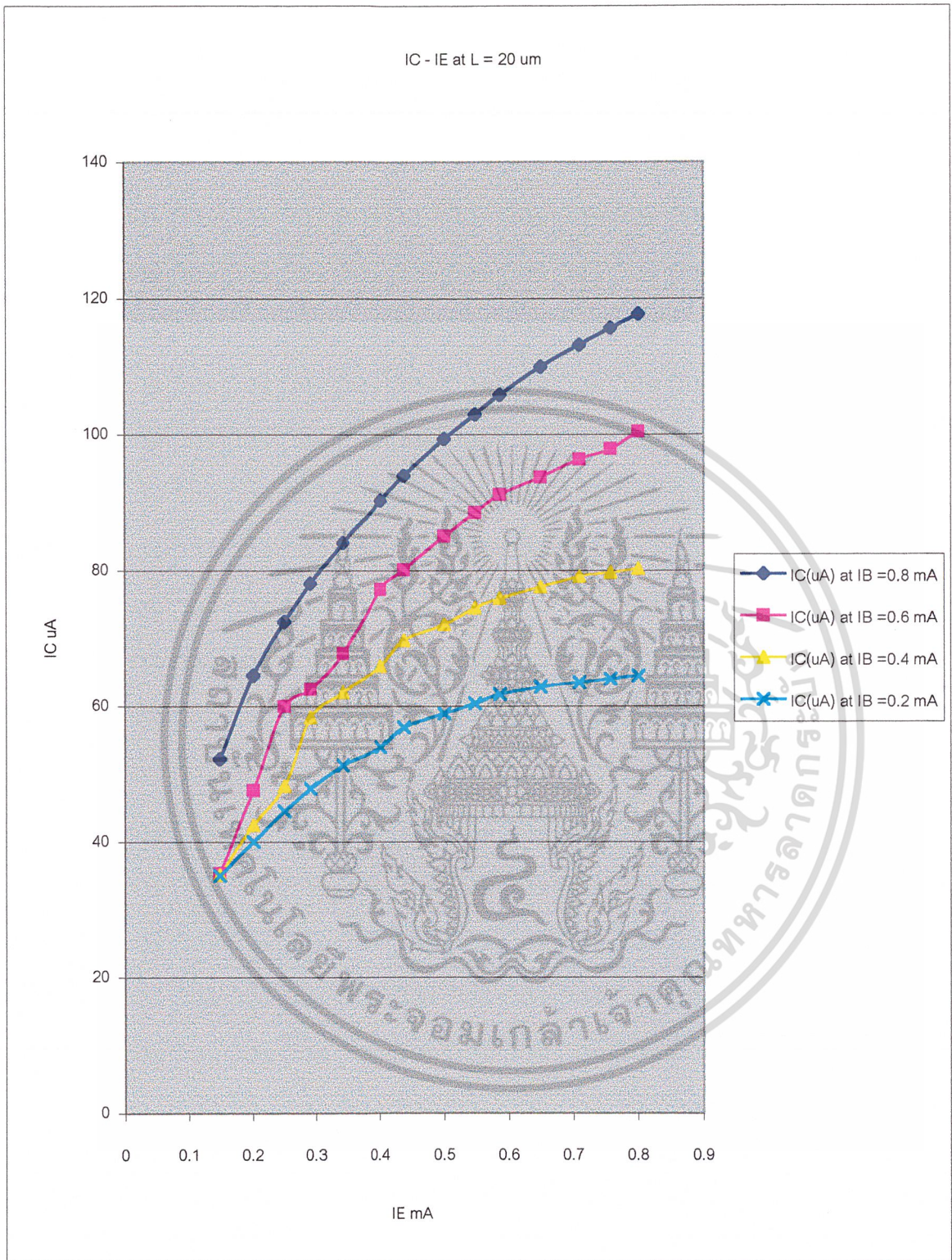
รูปที่ 6.16 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์
กับกระแสเบสที่ความกว้างเบส เท่ากับ 10 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



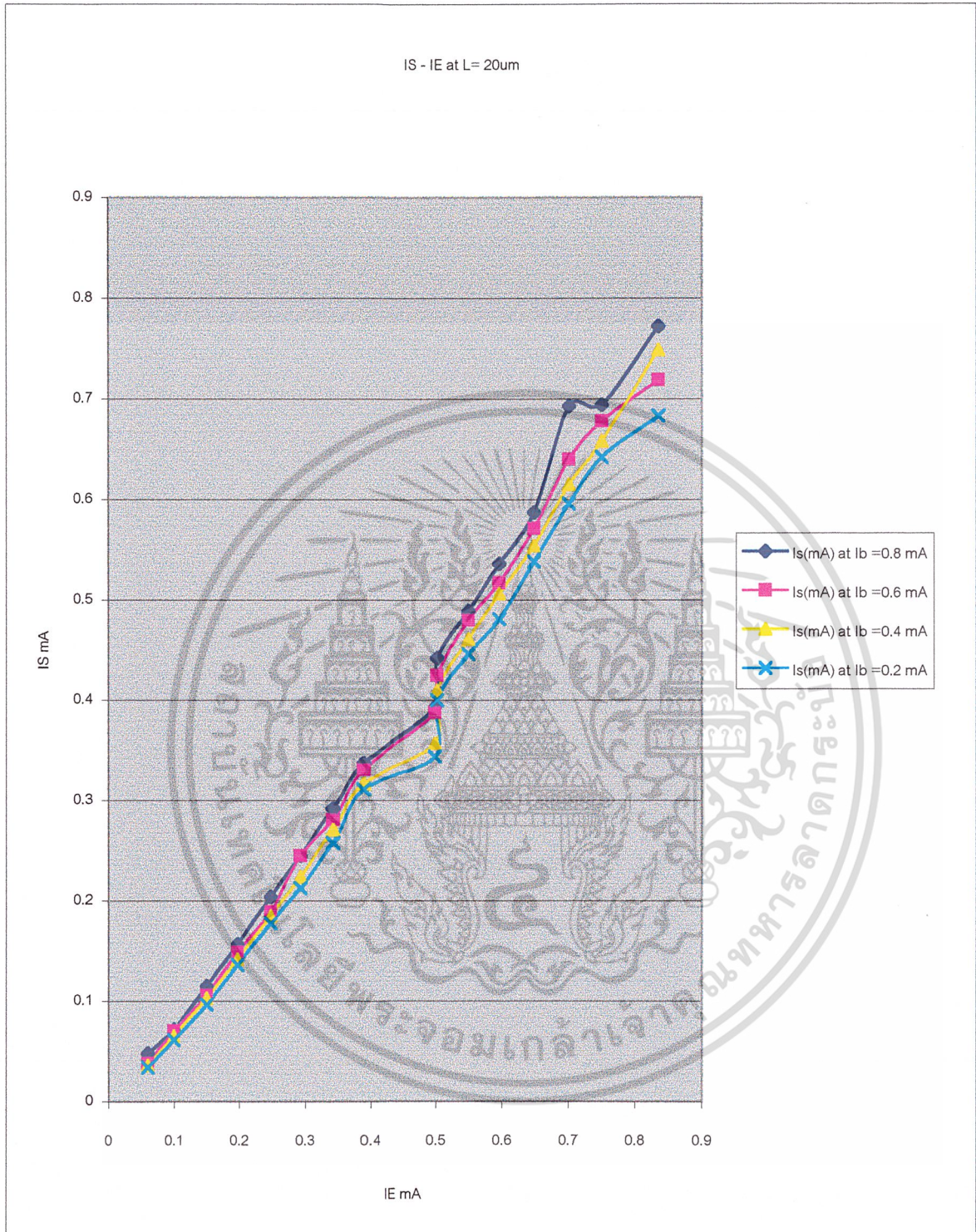
รูปที่ 6.17 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลกเตอร์
กับกระแสฐานรองที่ความกว้างเบส เท่ากับ 10 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



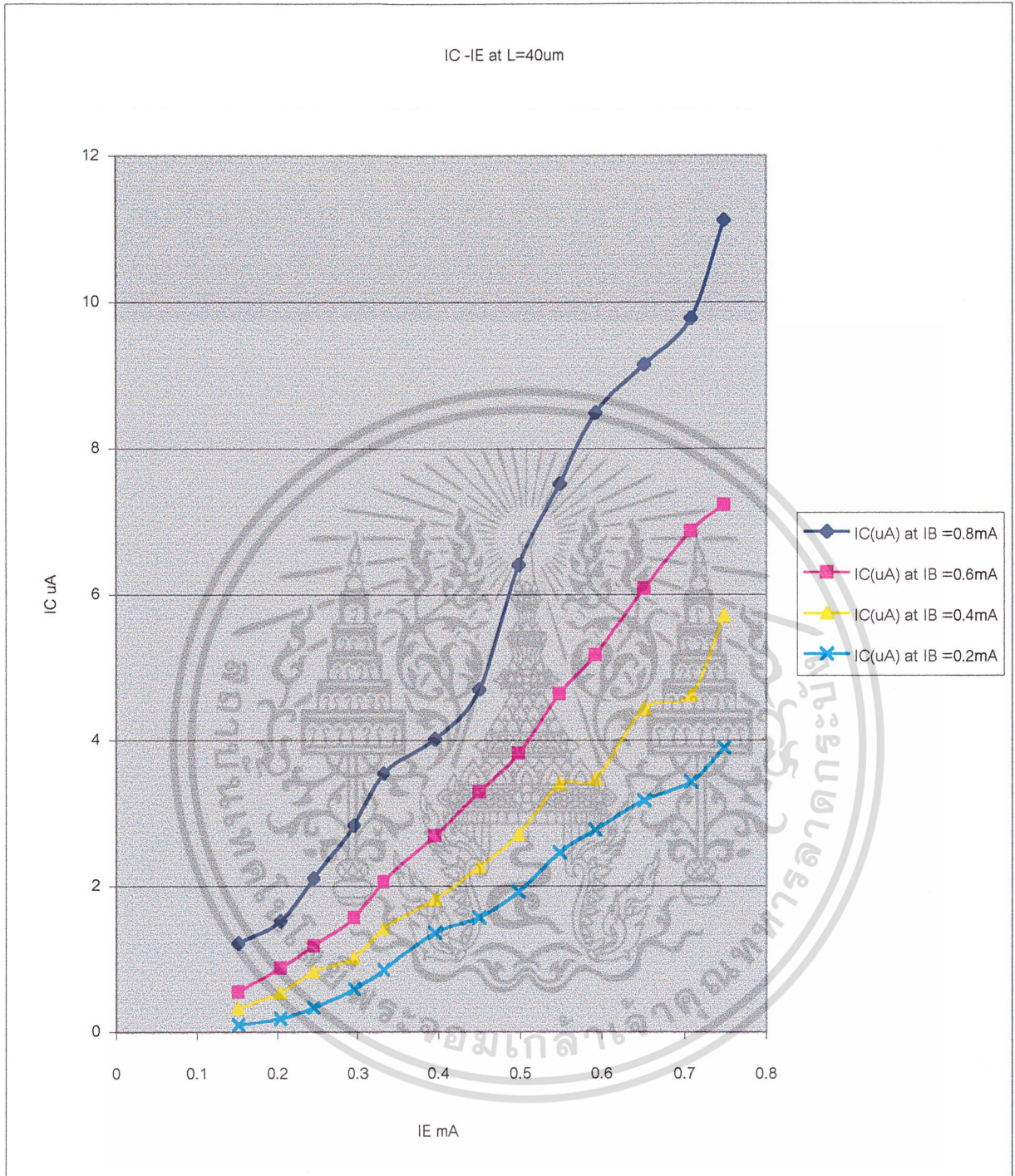
รูปที่ 6.18 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์
กับกระแสเบสที่ความกว้างเบส เท่ากับ 20 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



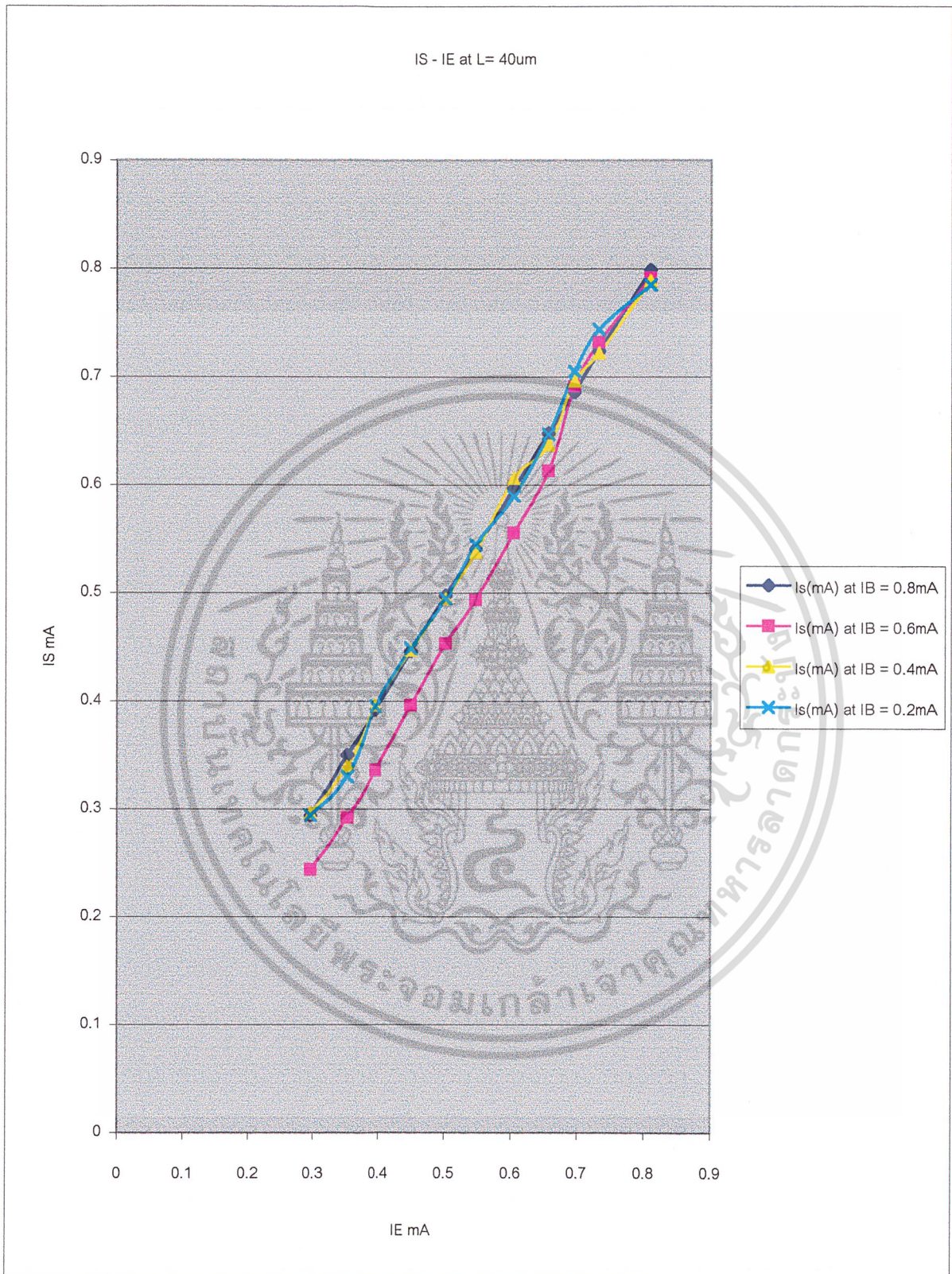
รูปที่ 6.19 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์
กับกระแสฐานรองที่ความกว้างเบส เท่ากับ 20 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.20 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์
กับกระแสอิมิตเตอร์ที่ความกว้างเบส เท่ากับ 40 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



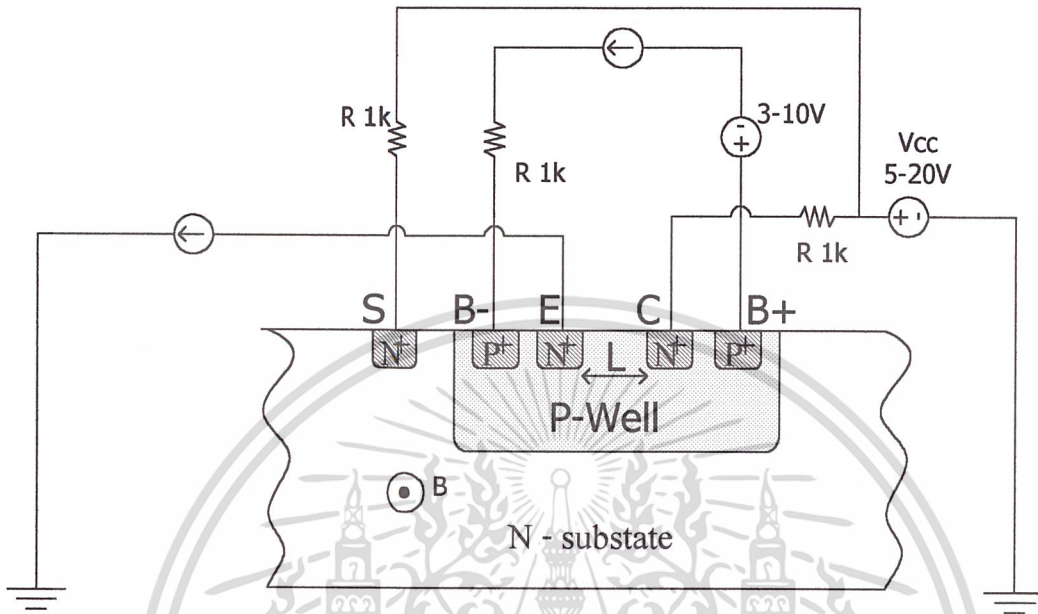
รูปที่ 6.21 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์

กับกระแสฐานรองที่ความกว้างเบส เท่ากับ 40 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

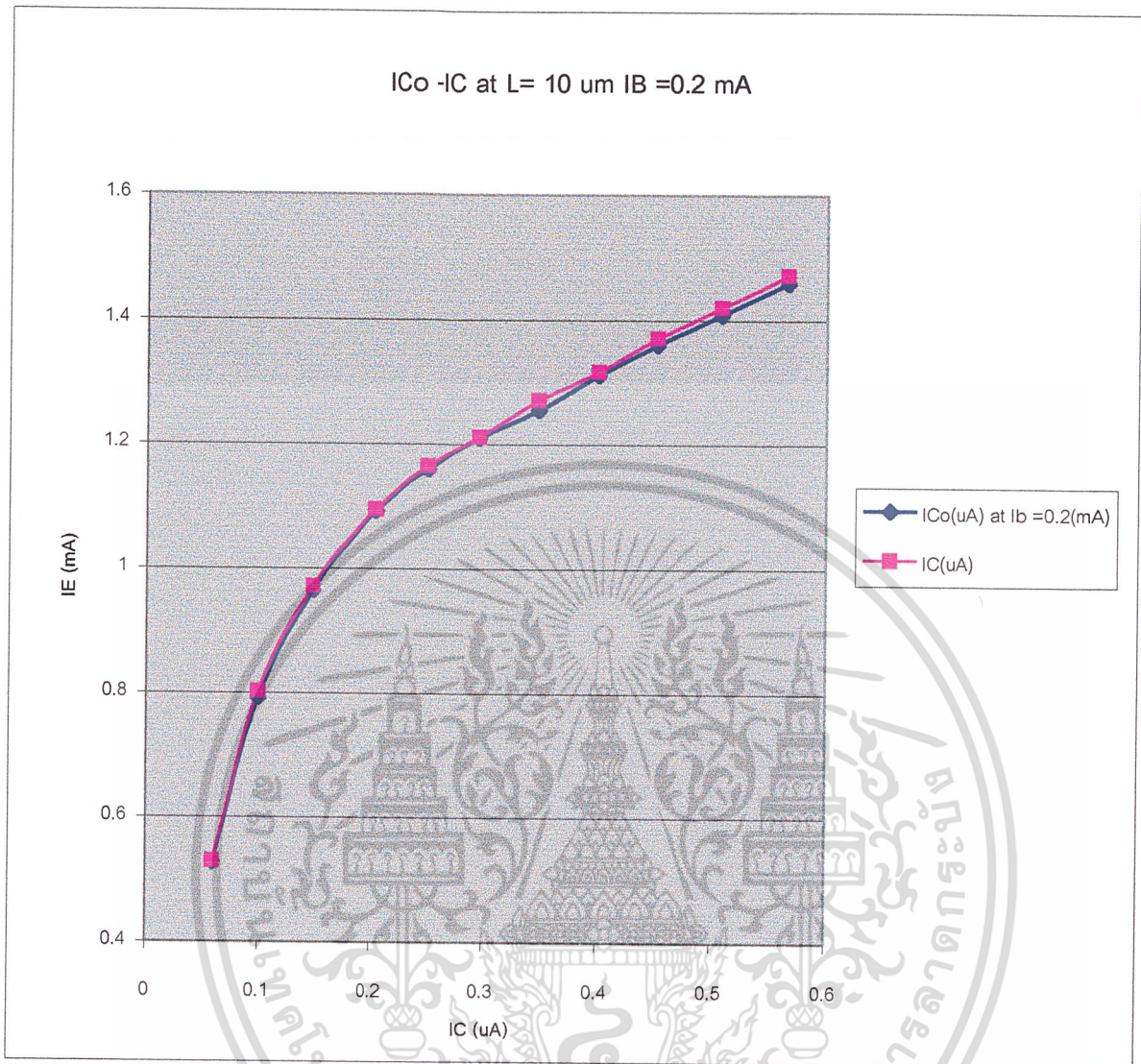
6.4 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก และ ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

ซึ่งวิธีการวัดแสดงไว้ในภาคผนวก ข และ ค โดยค่าที่ได้จากการวัดแสดงไว้ในภาคผนวก ก



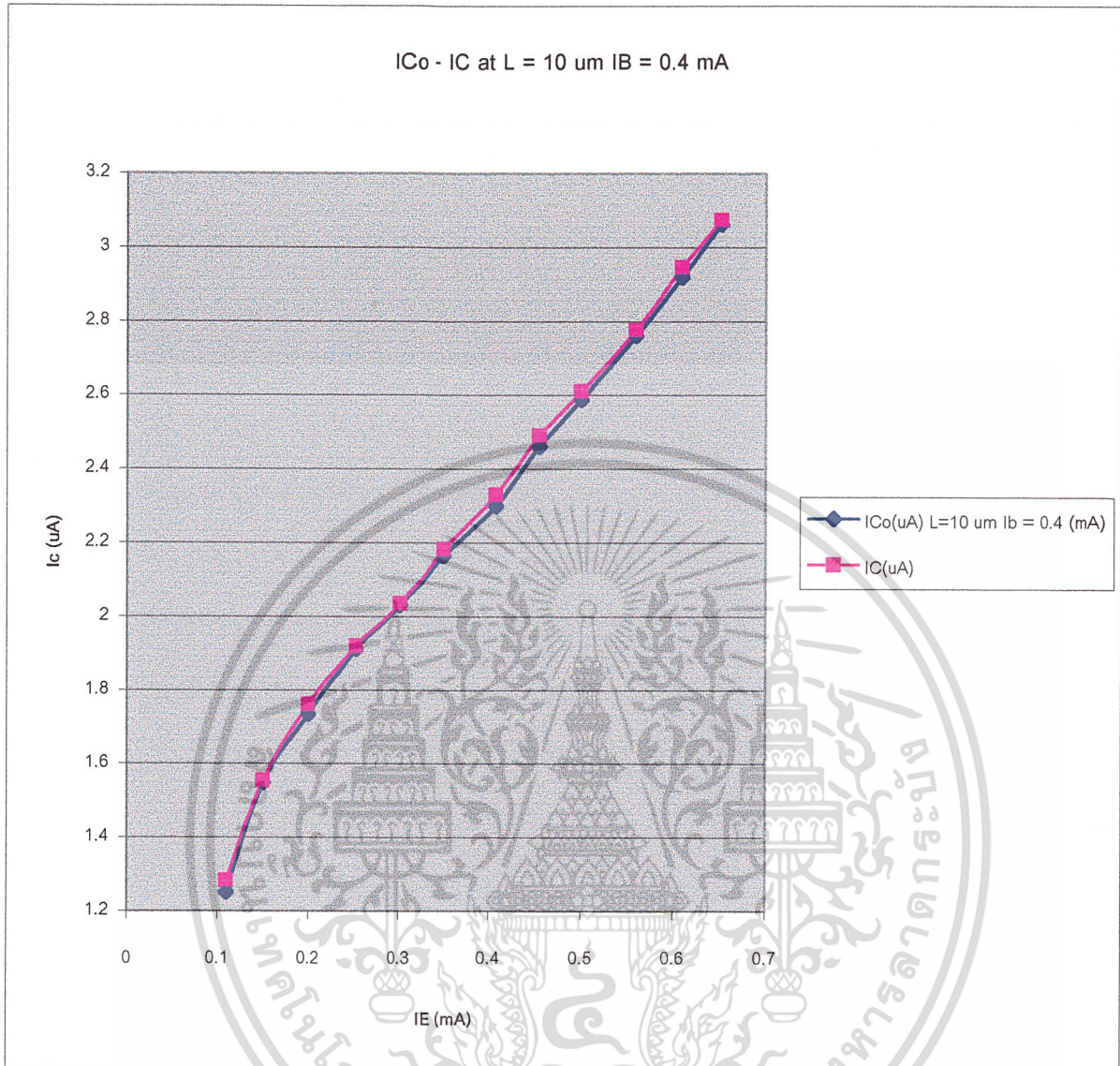
รูปที่ 6.22 แสดงการไบอัสพร้อมทั้งมีสนามแม่เหล็ก B ตัดผ่านระนาบในลักษณะขวาง

จากรูปที่ 6.22 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านจะเป็นผลให้เกิดกระแส I_C เพิ่มมากขึ้นส่วนกระแส I_S จะมีค่าลดลงเป็นสัดส่วนตามลำดับ โดยจะทดสอบให้ค่ากระแส I_B ที่ค่าหนึ่งก่อนแล้วปรับค่า I_E ไปเป็น 0.2-0.4 mA บันทึกผลการทดลอง โดยวัดผลที่เกิดจากความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ต่างกันซึ่งมีกระบวนการทดลองที่เหมือนกันคือ ให้ค่า I_B คงที่แล้วเปลี่ยนค่า I_E ไปเป็น 0.2-0.4 mA บันทึกผลการทดลอง แล้วนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของกระแส I_{C0} (กระแสขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก) กับกระแส I_C (กระแสเกิดขึ้นจากที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน) ได้ดังต่อไปนี้



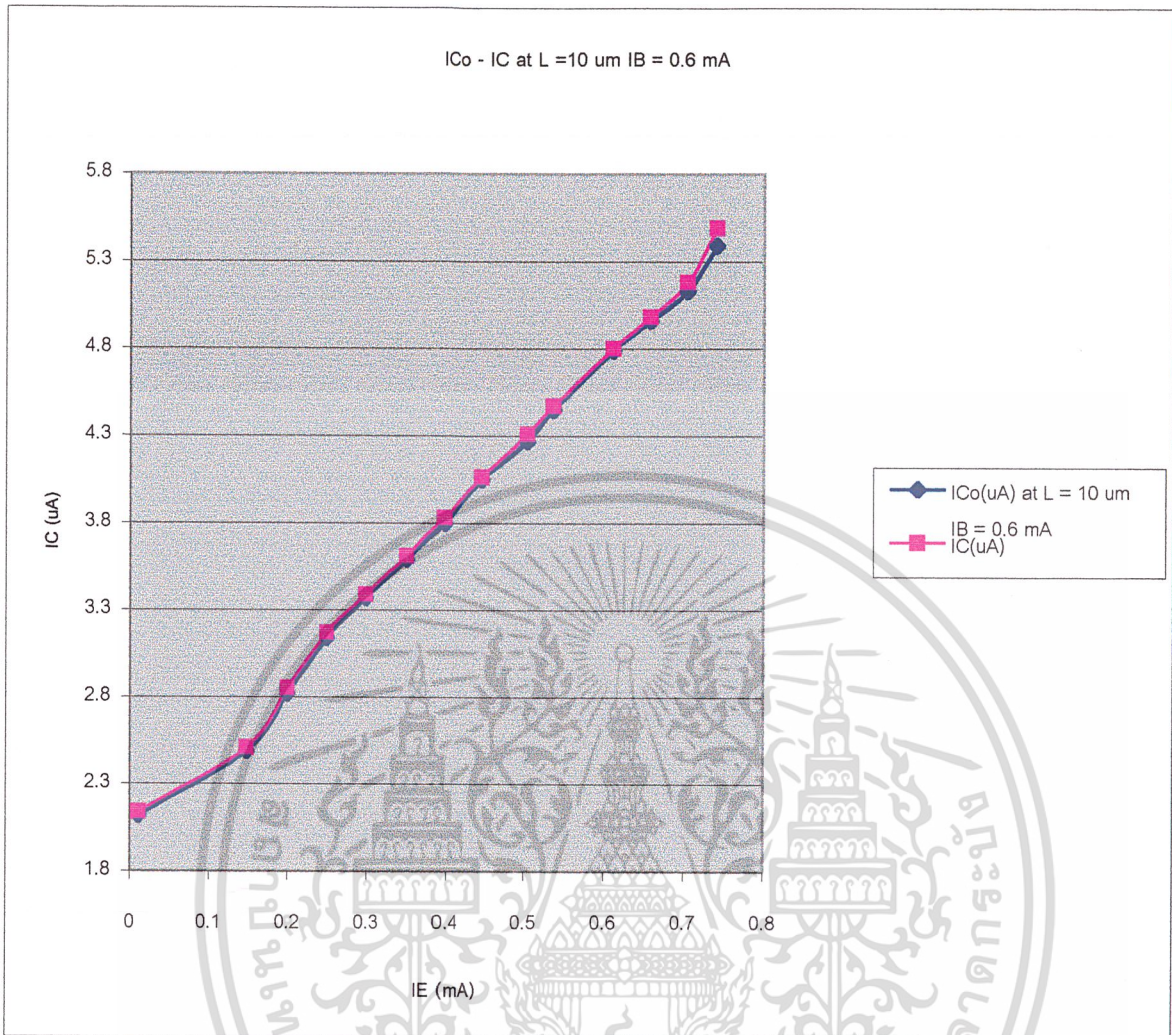
รูปที่ 6.23 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 10 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



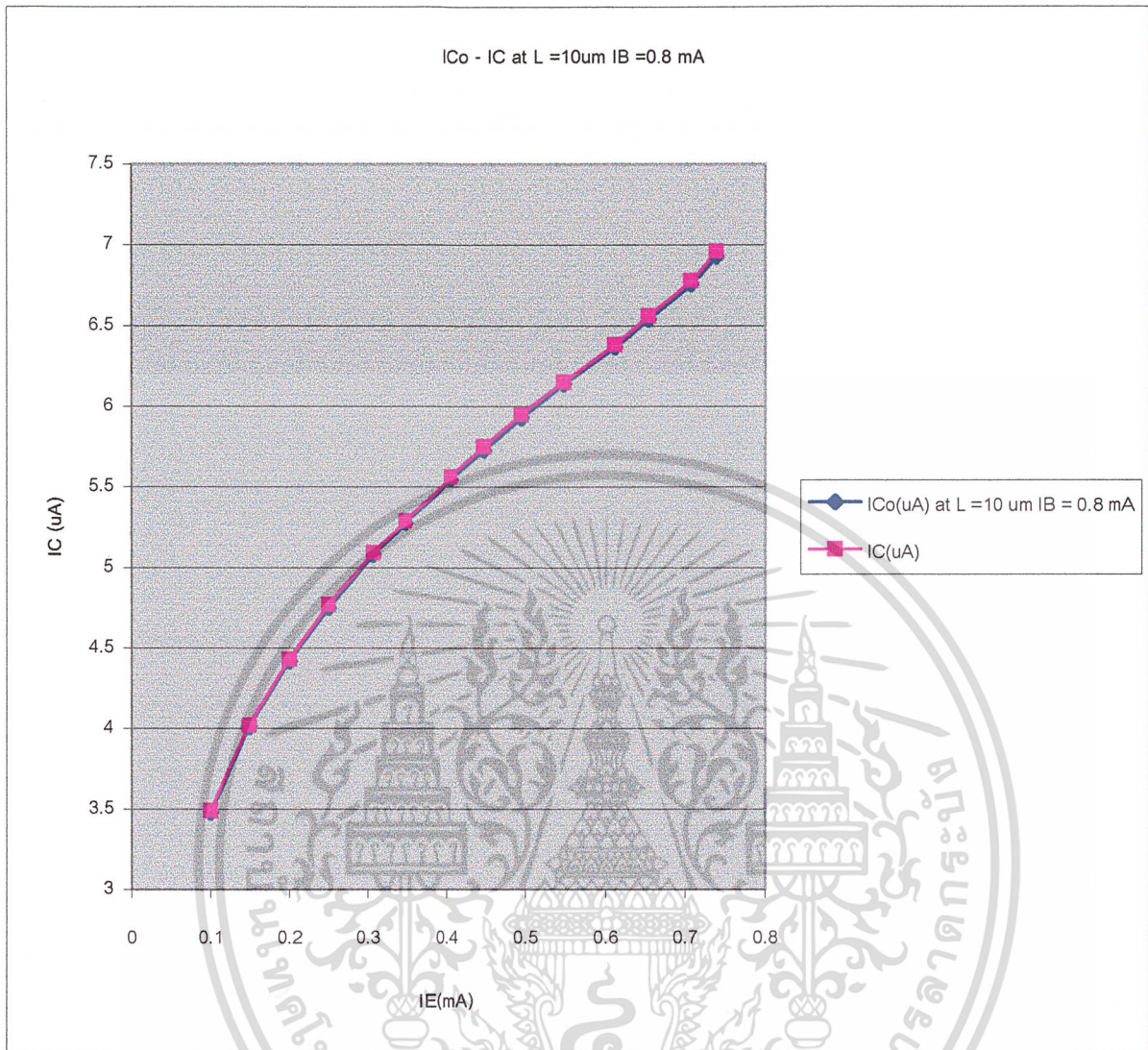
รูปที่ 6.24 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 10 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



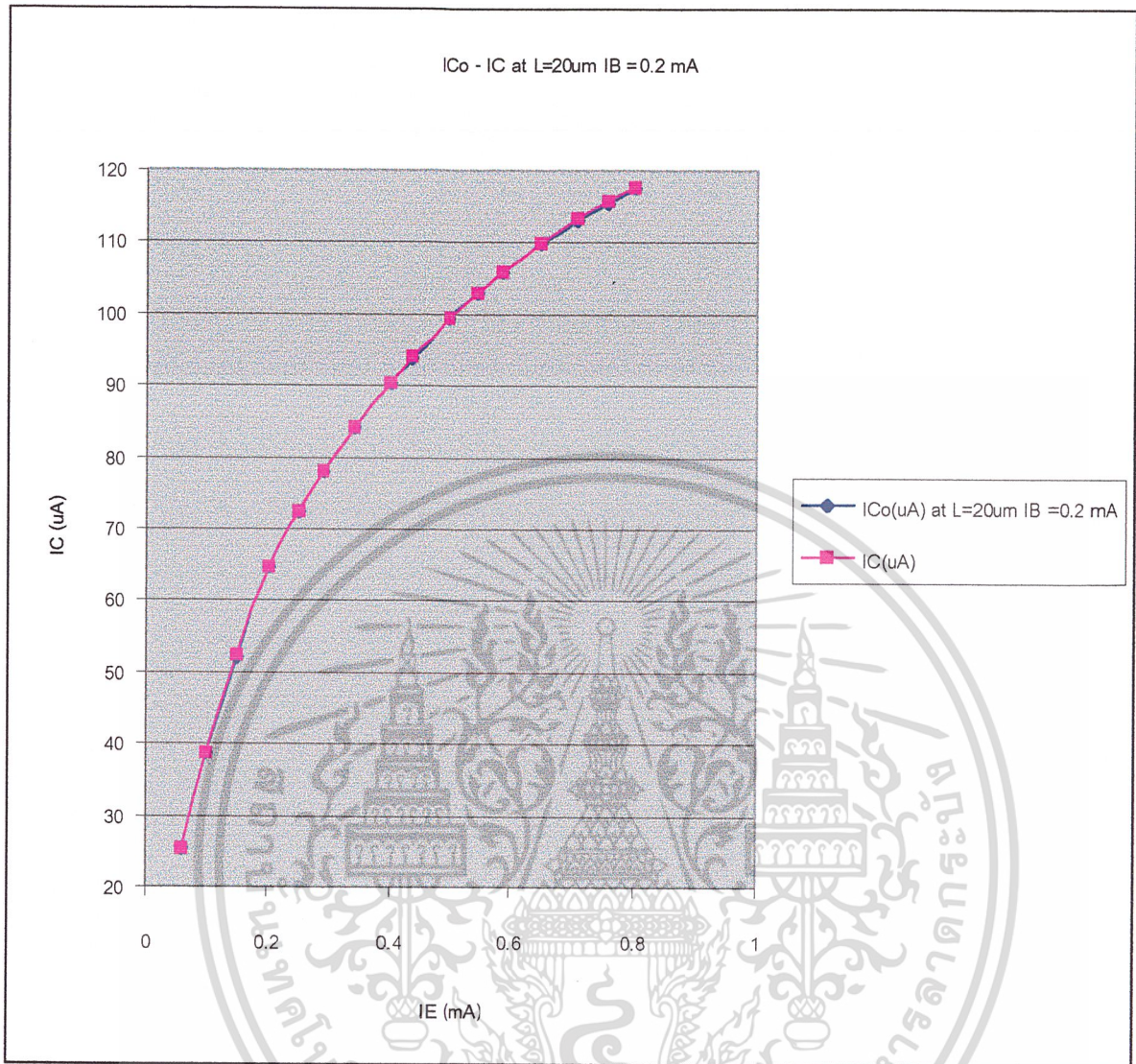
รูปที่ 6.25 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 10 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



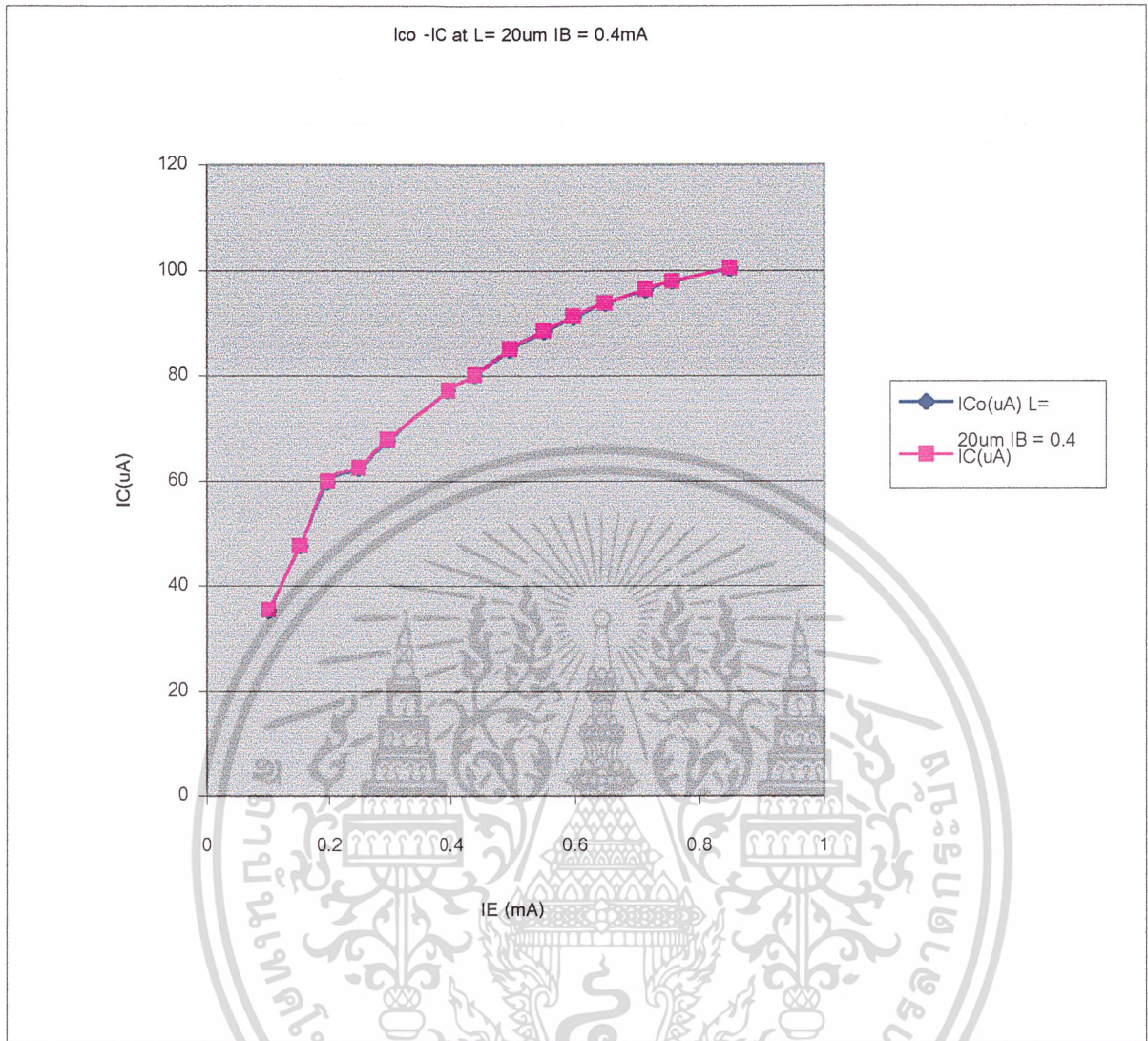
รูปที่ 6.26 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 10 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



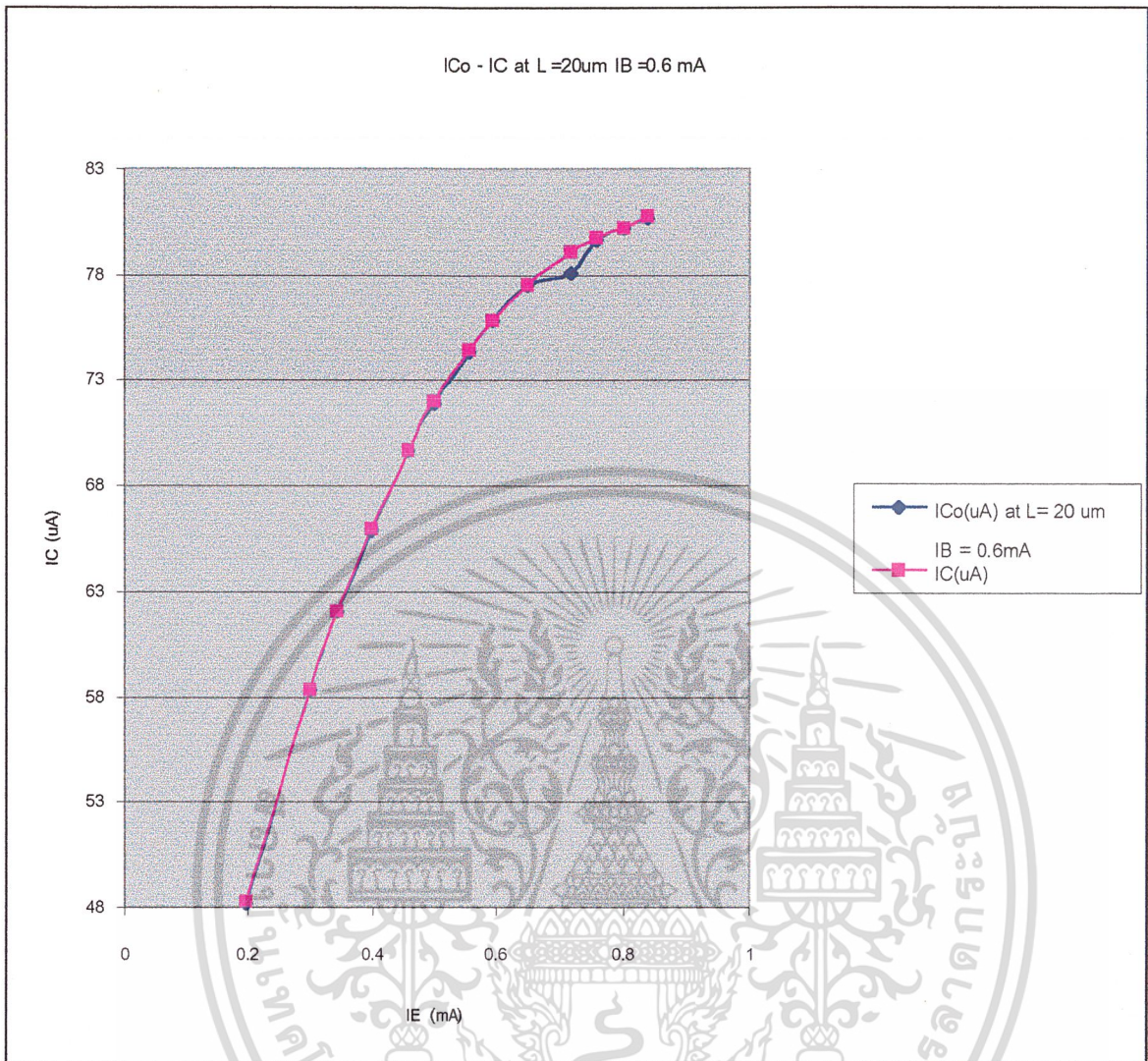
รูปที่ 6.27 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 20 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



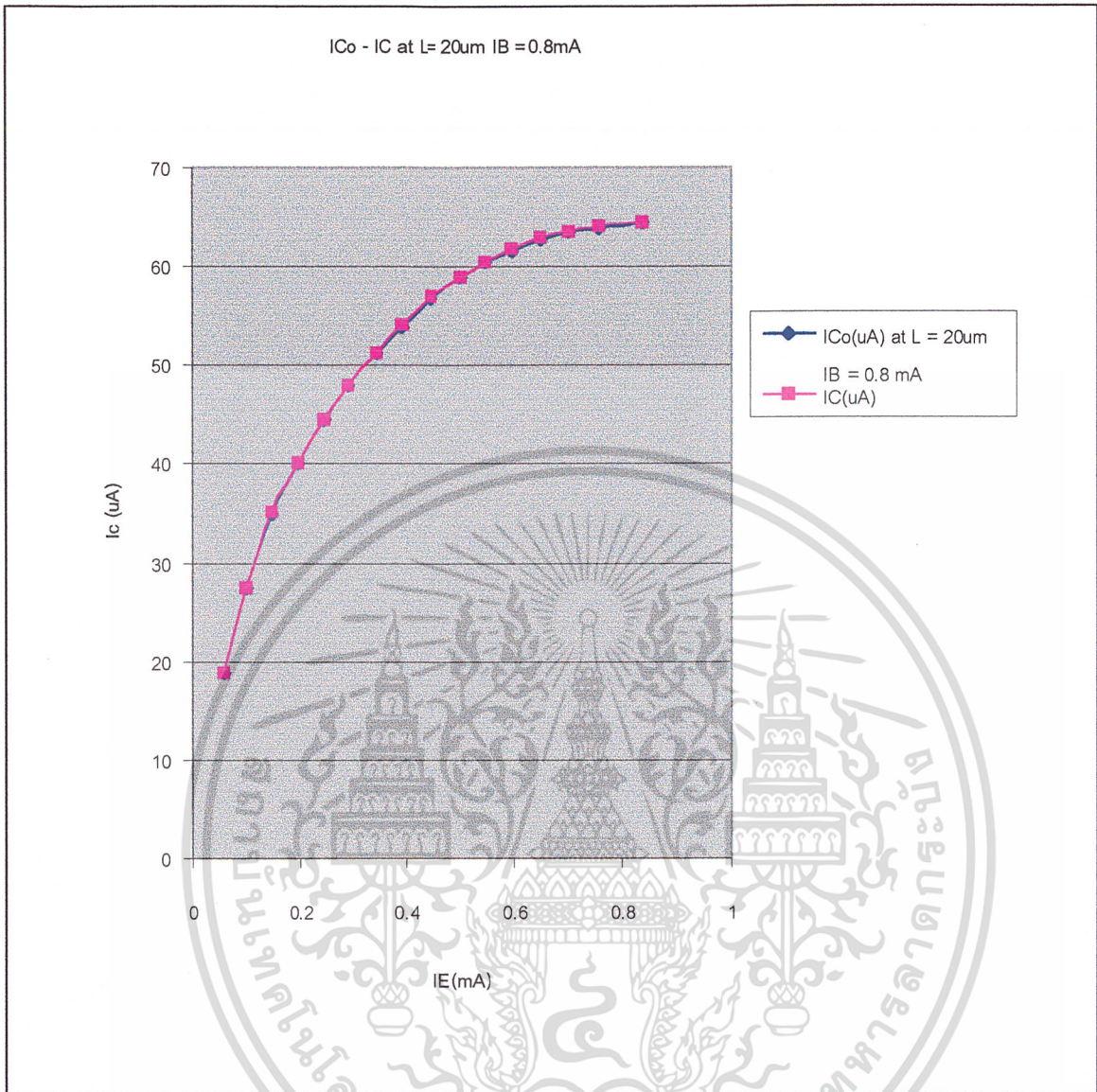
รูปที่ 6.28 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 20 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



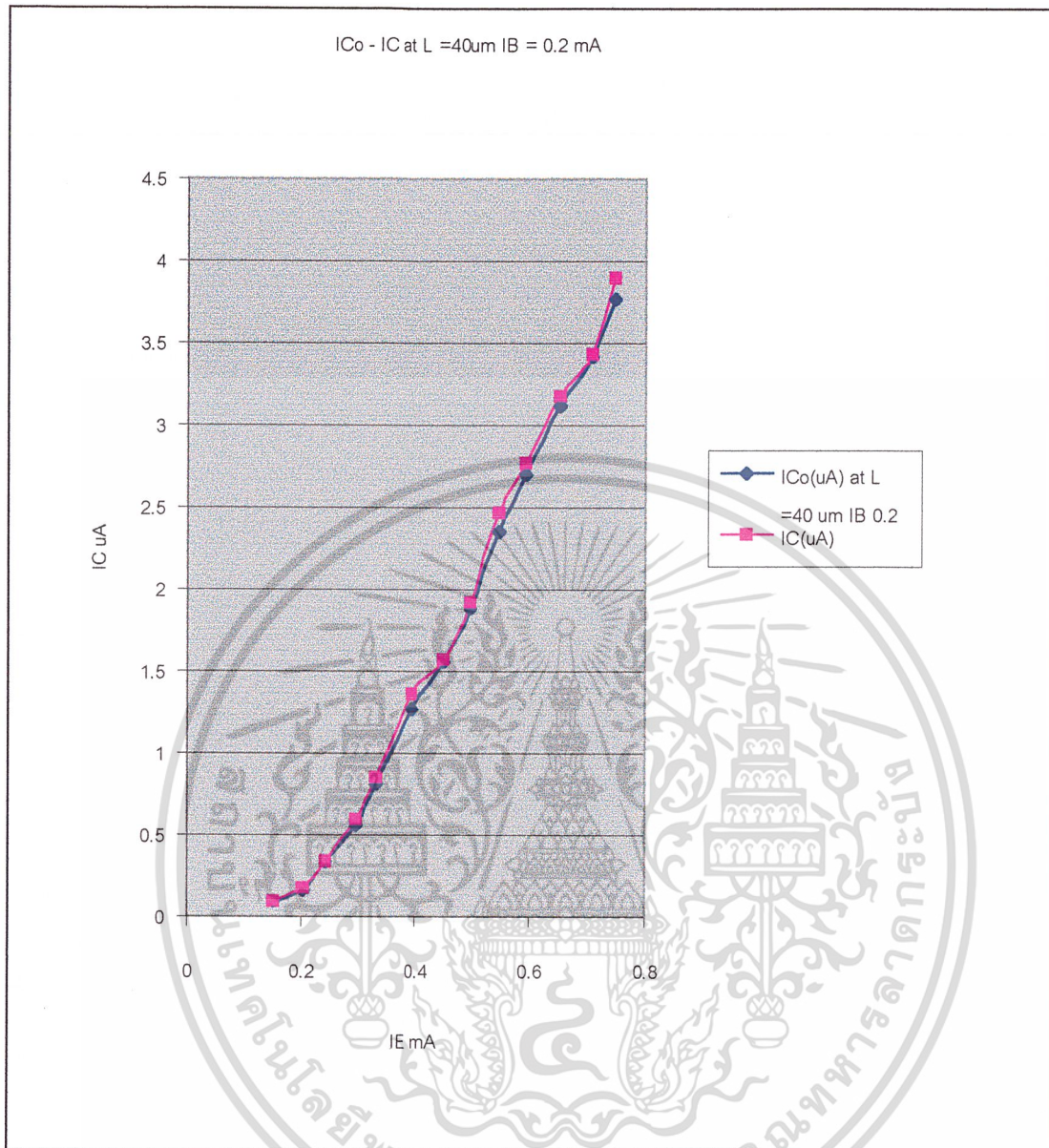
รูปที่ 6.29 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 20 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



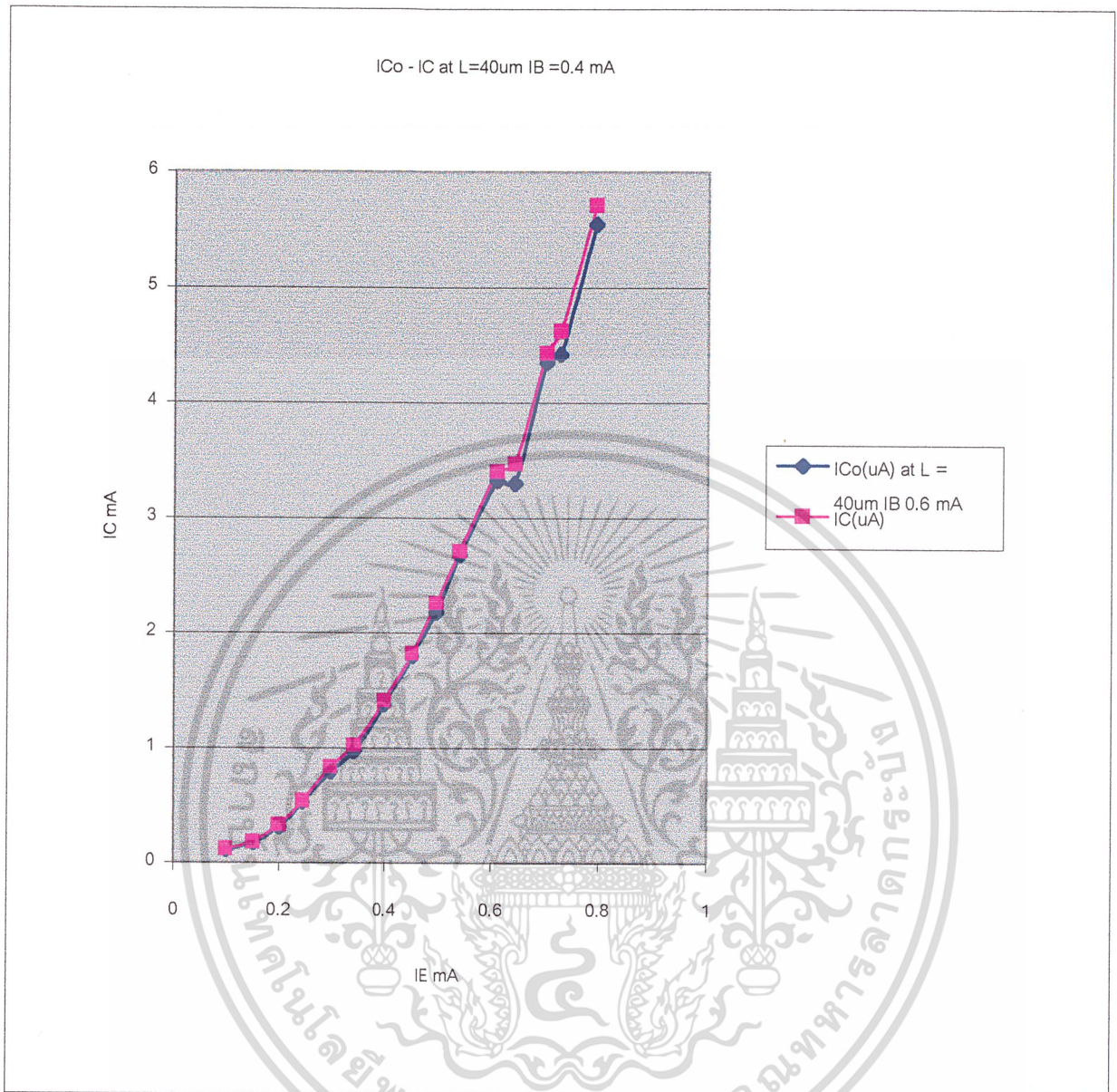
รูปที่ 6.30 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 20 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



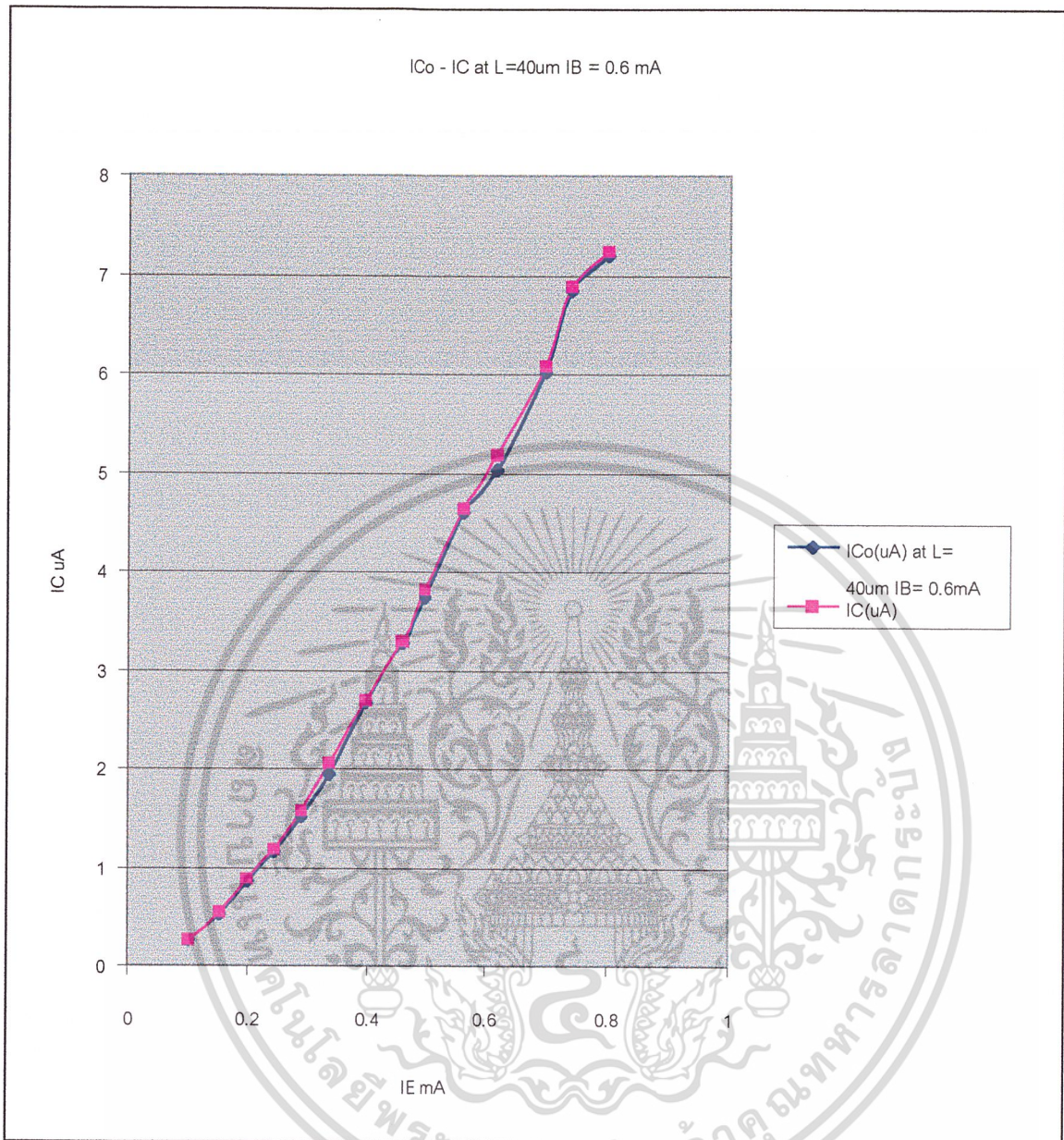
รูปที่ 6.31 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเล็กเตอร์ ความกว้างเบส 40 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



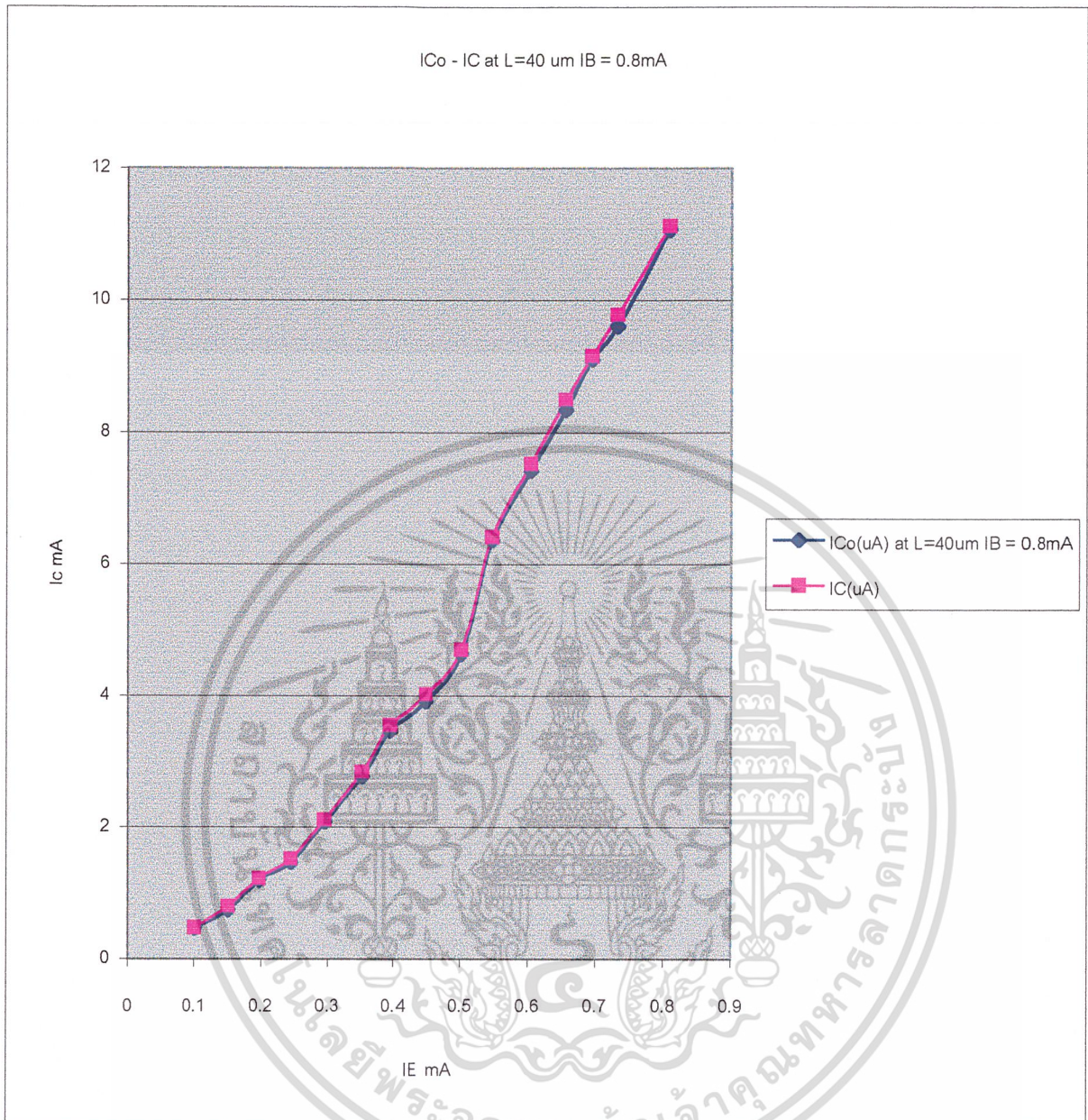
รูปที่ 6.32 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลกเตอร์ ความกว้างเบส 40 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.33 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 40 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

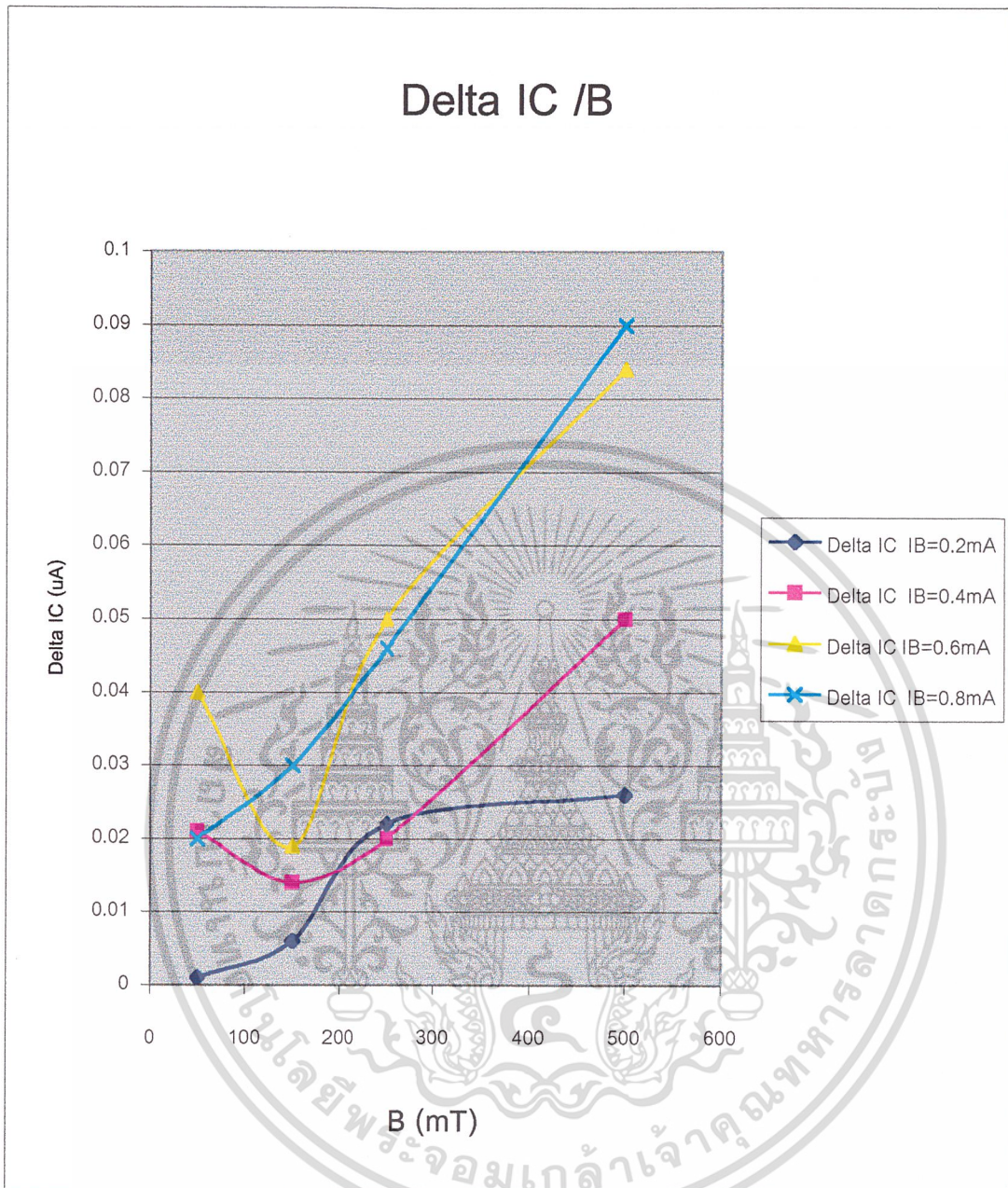


รูปที่ 6.34 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลกเตอร์ ความกว้างเบส 40 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

6.4.1 ผลของความไวในการตรวจจับสัญญาณแม่เหล็ก

นำผลของความแตกต่างระหว่าง I_C กับ I_{C0} นำมาพล็อตกราฟของค่าคลาดค่าโดยที่ $\Delta I_C = I_C - I_{C0}$ โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าของกระแส I_B ที่ต่างกันดังรูปที่ 6.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

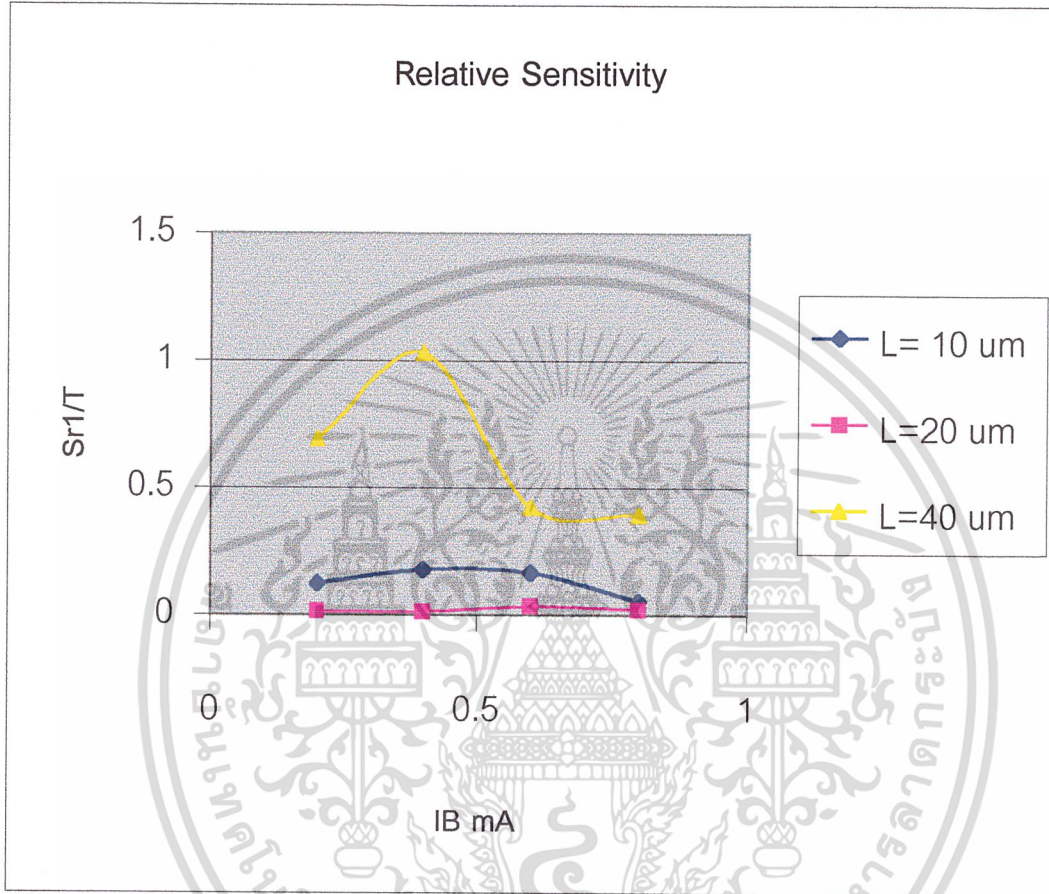


รูปที่ 6.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงของ
กระแสคอลเลคเตอร์ ต่อ สัญญาณแม่เหล็ก

จากรูปจะเห็นได้ว่าช่วงที่สนามแม่เหล็ก B มีค่าต่ำๆ 0-200 mT จะไม่มีเสถียรภาพแต่ถ้าสนามแม่เหล็ก B มีค่าตั้งแต่ 200 mT ขึ้นไปกราฟจะมีเสถียรภาพมากขึ้น โดยที่ค่ากระแสที่ I_B มีค่า 0.8 mA จะมีเสถียรภาพมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลของค่ากระแส I_C ที่ต่างกันนั้นจะนำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาความสัมพันธ์ของความไวในการเซนส์แม่เหล็กได้ดังสมการ $Sr = \frac{\Delta IC}{IC_0} \times \frac{1}{B}$ แล้วพล็อตกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 6.36



รูปที่ 6.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความไวในการตรวจสอบสัญญาณแม่เหล็ก

จากรูปที่ 6.36 จะเป็นการเปรียบเทียบความไวในการตอบสนองต่อแม่เหล็กโดยที่มีขนาดความยาว L ที่ต่างกันทำให้ทราบได้ว่าที่ความยาว $L = 40 \mu\text{m}$ จะมีความไวสูงแต่ในขณะที่ความยาว $L = 10 \mu\text{m}$ จะมีความเป็นลิเนียร์มากกว่า โดยในการทดลองนี้ได้ค่าความไวสูงที่สุดที่ $Sr = 1.1\text{T}^{-1}$

บทที่ 7

สรุปผล

ในการทดลองได้มีการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ ซึ่งสรุปเป็นประเด็นต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

การทดสอบความลึกพีเวล

สำหรับการทดสอบความลึกพีเวล ซึ่งจะต้องมีความลึกประมาณ 2 ไมโครเมตร แต่สามารถสร้างได้ลึกถึง 4 ไมโครเมตร ซึ่งถือว่าเป็นผลดีกับการสร้างต่อไปเพราะสามารถสร้างอุปกรณ์ให้อยู่ในพีเวลเพื่อมั่นใจได้ว่าการสร้างชั้นของ N^+ และ P^+ จะไม่ทะลุชั้นพีเวelnั่นเอง

การวัดคุณสมบัติของรอยต่อ โดยใช้เครื่องเคิร์ฟแทรเซอร์ (Curve tracer) ทำให้ได้ข้อสรุปว่าคุณสมบัติของรอยต่อเป็นไปตามทฤษฎีการให้ไบอัสโดยหากเป็นรอยต่อพี-เอ็น จะเป็นไปตามกราฟคุณสมบัติรอยต่อ พี-เอ็น หากเป็นรอยต่อ P-N-P กราฟจะมีลักษณะแบนราบและหากเป็นรอยต่อที่มีชั้นสารรอยต่อชนิดเดียวกันจะเป็นกราฟลิเนียร์มีคุณสมบัติเป็นความต้านทานนั่นเอง

การทดสอบแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ใช้ LM334 เป็นตัวควบคุมกระแสและใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ $VR = 10 K$ เป็นตัวปรับกระแสซึ่งสามารถปรับให้ค่าคงที่ได้ตามที่ต้องการ

การทดสอบการไบอัสให้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์

หลังจากที่ทดสอบแหล่งจ่ายกระแสคงที่แล้วนำมาไบอัสให้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์โดยปรับให้ค่า I_B คงที่ ค่า ๆ หนึ่งก่อน แล้วเปลี่ยนค่า I_B ไปเรื่อย ๆ สังเกตผลของ I_{C0} และเมื่อให้สนามแม่เหล็กจะได้ I_C ซึ่งจะได้ $\Delta I_C = I_C - I_{C0}$ โดยค่า I_C จะมากกว่า I_{C0} ดังนั้นกล่าวได้ว่า กระแสคอลเลกเตอร์ที่เพิ่มมากขึ้นนี้เป็นผลเนื่องมาจากการให้สนามแม่เหล็กเกิดแรงลอเรนซ์ผลักกระแสมาที่ขาคอลเลกเตอร์เพิ่มมากขึ้น และยังจะสังเกตผลที่มากขึ้นได้ง่าย จากค่าของกระแส I_B ที่ค่าสูง ๆ นั้นเองและผลของกระแสที่เกิดจากตัวแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่มีความยาว L ต่าง ๆ กัน ทำให้ทราบว่าถ้าหากค่า L สั้น ๆ ($L = 10 \mu m$) จะมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุด

จากการทดลองปรับค่าความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กให้มีความเข้มสูงขึ้นไปจะทำให้มีอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลง I_{C0} มากขึ้น ซึ่งตรงตามทฤษฎี $F = q(v \times B)$ ทั้งนี้เพราะมีแรงผลักประจุมากขึ้นทำให้ I_C เพิ่มขึ้นมากค่าของ ΔI_C จึงสูงนั่นเอง โดยค่าที่วัดได้จะมีความเป็นเชิงเส้นได้ดีเมื่อให้สนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่า 200 mT และค่ากระแส $I_B = 0.8 mA$ เมื่อทดสอบผลการทดลองต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้วกล่าวได้ว่า แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถเซ็นสนามแม่เหล็กได้ โดยวัดค่าออกมาเป็นกระแส ซึ่งนำมาคำนวณค่ารีเฟฟเซนส์ซีตีวิตี (Relative Sensitivity) ได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Sr = \frac{\Delta IC}{ICo} \times \frac{1}{B}$$

ซึ่งค่าที่ได้จะมีค่าตั้งแต่ 0.01 ถึง 1.1 T⁻¹ และจะมีค่ามากที่สุดที่ค่า L = 40 um และมีเสถียรภาพมากที่สุดที่ค่า L = 10 um อาจกล่าวได้ว่าค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ได้นี้ยังมีค่าน้อยและยังไม่มีเสถียรภาพมากพอที่จะนำไปใช้งานได้จริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลการวัด

ตารางที่ 1 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์
 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา
 ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
1.46	0.565	0.566	1.472	0.565	0.566	0.012	0.1643836
1.409	0.507	0.508	1.42	0.507	0.508	0.011	0.1561391
1.36	0.451	0.452	1.371	0.45	0.452	0.011	0.1617647
1.312	0.3976	0.4004	1.317	0.3973	0.4004	0.005	0.0762195
1.255	0.3469	0.348	1.271	0.3465	0.348	0.016	0.2549801
1.21	0.295	0.296	1.212	0.293	0.296	0.002	0.0330579
1.16	0.248	0.249	1.165	0.247	0.249	0.005	0.0862069
1.093	0.2028	0.2038	1.095	0.2026	0.2038	0.002	0.0365965
0.965	0.1479	0.148	0.971	0.1477	0.148	0.006	0.1243523
0.792	0.09948	0.1	0.802	0.099	0.1	0.01	0.2525253
0.528	0.05976	0.06	0.53	0.059	0.06	0.002	0.0757576

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์
 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50มิลลิเทสลา
 ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
3.063	0.65	0.652	3.074	0.6494	0.65	0.011	0.071825
2.9198	0.6068	0.6091	2.945	0.6063	0.6091	0.0252	0.1726146
2.761	0.5556	0.5593	2.776	0.5555	0.5593	0.015	0.1086563
2.589	0.498	0.5	2.61	0.4976	0.5	0.021	0.1622248
2.461	0.452	0.4544	2.489	0.4516	0.4544	0.028	0.2275498
2.3	0.405	0.4072	2.33	0.4049	0.4072	0.03	0.2608696
2.165	0.3487	0.3504	2.183	0.3484	0.3504	0.018	0.1662818
2.031	0.2996	0.3012	2.035	0.2994	0.3012	0.004	0.0393895
1.912	0.2509	0.2529	1.92	0.2506	0.2526	0.008	0.083682
1.734	0.1985	0.2	1.76	0.1983	0.2	0.026	0.2998847
1.549	0.1489	0.1502	1.554	0.1488	0.1502	0.005	0.0645578
1.252	0.10067	0.1098	1.282	0.10049	0.1098	0.03	0.4792332

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50มิลลิเทสลา
ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
5.39	0.735	0.741	5.49	0.733	0.741	0.1	0.3710575
5.13	0.699	0.704	5.18	0.698	0.704	0.05	0.1949318
4.96	0.653	0.658	4.98	0.652	0.658	0.02	0.0806452
4.79	0.606	0.611	4.8	0.604	0.611	0.01	0.0417537
4.45	0.532	0.537	4.47	0.53	0.537	0.02	0.0898876
4.27	0.5	0.504	4.31	0.499	0.504	0.04	0.1873536
4.05	0.443	0.447	4.06	0.442	0.447	0.01	0.0493827
3.8	0.394	0.398	3.83	0.393	0.398	0.03	0.1578947
3.59	0.347	0.35	3.61	0.345	0.35	0.02	0.1114206
3.37	0.296	0.299	3.39	0.294	0.299	0.02	0.1186944
3.14	0.2474	0.25	3.17	0.247	0.25	0.03	0.1910828
2.82	0.197	0.1997	2.85	0.1968	0.1997	0.03	0.212766
2.49	0.146	0.148	2.51	0.1459	0.148	0.02	0.1606426

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50มิลลิเทสลา
ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
6.93	0.733	0.739	6.96	0.732	0.739	0.03	0.0865801
6.76	0.701	0.707	6.78	0.7009	0.707	0.02	0.0591716
6.54	0.646	0.654	6.56	0.645	0.654	0.02	0.0611621
6.37	0.606	0.612	6.38	0.605	0.612	0.01	0.0313972
6.14	0.541	0.548	6.15	0.54	0.548	0.01	0.0325733
5.93	0.489	0.495	5.95	0.491	0.495	0.02	0.0674536
5.73	0.442	0.448	5.75	0.441	0.448	0.02	0.069808
5.55	0.4006	0.406	5.56	0.4004	0.406	0.01	0.036036
5.28	0.342	0.347	5.288	0.341	0.347	0.008	0.030303
5.08	0.302	0.307	5.09	0.301	0.307	0.01	0.0393701
4.75	0.244	0.25	4.77	0.243	0.25	0.02	0.0842105
4.42	0.195	0.2	4.429	0.195	0.2	0.009	0.040724
4.01	0.145	0.149	4.02	0.145	0.149	0.01	0.0498753
3.48	0.09654	0.1	3.49	0.09651	0.1	0.01	0.0574713

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์
 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50มิลลิเทสลา
 ความกว้าง เบสเท่ากับ 20 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก			Delta IC(uA)	Sr(1/T)
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)		
117.6	0.683	0.8	117.7	0.683	0.8	0.1	0.0170068
115.4	0.642	0.757	115.7	0.641	0.757	0.3	0.0519931
113	0.596	0.709	113.2	0.596	0.709	0.2	0.0353982
109.93	0.538	0.649	109.96	0.538	0.649	0.03	0.005458
105.8	0.481	0.586	105.82	0.48	0.586	0.02	0.0037807
102.97	0.446	0.548	102.99	0.446	0.548	0.02	0.0038846
99.3	0.4	0.5	99.37	0.4	0.5	0.07	0.0140987
93.9	0.344	0.438	93.96	0.342	0.438	0.06	0.0127796
90.29	0.311	0.401	90.32	0.311	0.401	0.03	0.0066453
84.069	0.258	0.342	84.11	0.258	0.342	0.041	0.0097539
78.06	0.213	0.291	78.09	0.212	0.291	0.03	0.0076864
72.38	0.1776	0.25	72.44	0.177	0.25	0.06	0.0165792
64.58	0.136	0.201	64.6	0.136	0.201	0.02	0.0061939
52.18	0.09662	0.148	52.24	0.09662	0.148	0.06	0.0229973
38.66	0.06119	0.09978	38.67	0.06116	0.09978	0.01	0.0051733
25.44	0.03415	0.05955	25.45	0.034152	0.05955	0.01	0.0078616

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50มิลลิเทสลา
ความกว้าง เบสเท่ากับ 20 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
100.36	0.749	0.848	100.49	0.748	0.848	0.13	0.0259067
97.88	0.658	0.755	97.89	0.657	0.755	0.01	0.0020433
96.32	0.615	0.712	96.35	0.614	0.712	0.03	0.0062292
93.68	0.554	0.647	93.72	0.553	0.647	0.04	0.0085397
91.15	0.506	0.597	91.18	0.505	0.597	0.03	0.0065826
88.47	0.461	0.549	88.5	0.46	0.549	0.03	0.006782
85.01	0.41	0.495	85.03	0.409	0.495	0.02	0.0047053
80.05	0.357	0.438	80.09	0.357	0.438	0.04	0.0099938
77.2	0.317	0.394	77.23	0.317	0.394	0.03	0.007772
67.71	0.226	0.294	67.78	0.224	0.294	0.07	0.0206764
62.48	0.185	0.247	62.5	0.184	0.247	0.02	0.006402
59.8	0.142	0.197	60	0.142	0.197	0.2	0.0668896
47.65	0.103	0.151	47.66	0.102	0.151	0.01	0.0041973
35.38	0.06511	0.10049	35.4	0.0649	0.10049	0.02	0.0113058

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50มิลลิเทสลา
ความกว้าง เบสเท่ากับ 20 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(μ A)	IS(mA)	IE(mA)	IC(μ A)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(μ A)	Sr(1/T)
79.72	1.2	1.28	79.76	1.2	1.28	0.04	0.0100351
81.41	0.877	0.959	81.48	0.877	0.959	0.07	0.0171969
80.67	0.756	0.837	80.76	0.754	0.837	0.09	0.0223131
80.17	0.719	0.8	80.24	0.718	0.8	0.07	0.0174629
79.62	0.678	0.758	79.73	0.675	0.758	0.11	0.0276312
78.04	0.64	0.718	79.07	0.639	0.718	1.03	0.2639672
77.5	0.571	0.649	77.52	0.57	0.649	0.02	0.0051613
75.79	0.517	0.592	75.85	0.516	0.592	0.06	0.0158332
74.31	0.48	0.555	74.45	0.479	0.555	0.14	0.03768
71.92	0.425	0.497	71.99	0.425	0.497	0.07	0.0194661
69.69	0.388	0.457	69.7	0.388	0.457	0.01	0.0028699
65.91	0.331	0.396	65.93	0.33	0.396	0.02	0.0060689
62.01	0.281	0.343	62.09	0.281	0.343	0.08	0.0258023
58.3	0.245	0.298	58.32	0.24	0.298	0.02	0.0068611
48.2	0.149	0.197	48.24	0.149	0.197	0.04	0.0165975

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50มิลลิเทสลา
ความกว้าง เบสเท่ากับ 20 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
64.41	0.772	0.836	64.43	0.771	0.836	0.02	0.0062102
63.92	0.694	0.757	64.01	0.69	0.757	0.09	0.0281602
63.45	0.639	0.701	63.47	0.638	0.701	0.02	0.0063042
62.72	0.587	0.649	62.87	0.585	0.649	0.15	0.0478316
61.6	0.536	0.597	61.72	0.535	0.597	0.12	0.038961
60.38	0.489	0.549	60.42	0.484	0.549	0.04	0.0132494
58.9	0.442	0.502	58.95	0.441	0.502	0.05	0.0169779
56.84	0.393	0.449	56.88	0.39	0.449	0.04	0.0140746
53.94	0.337	0.391	54.01	0.336	0.391	0.07	0.0259548
51.23	0.292	0.343	51.26	0.291	0.343	0.03	0.0117119
47.85	0.245	0.293	47.87	0.244	0.293	0.02	0.0083595
44.5	0.204	0.248	44.52	0.201	0.248	0.02	0.0089888
40.05	0.157	0.197	40.08	0.157	0.197	0.03	0.0149813
35	0.115	0.15	35.08	0.115	0.15	0.08	0.0457143
27.44	0.07198	0.09932	27.46	0.07197	0.09932	0.02	0.0145773

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์
 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50มิลลิเทสลา
 ความกว้าง เบสเท่ากับ 40 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
3.44	0.785	0.792	3.57	0.794	0.792	0.13	0.755814
3.77	0.744	0.748	3.9	0.744	0.748	0.13	0.6896552
3.42	0.705	0.708	3.43	0.705	0.708	0.01	0.0584795
3.12	0.647	0.651	3.18	0.647	0.651	0.06	0.3846154
2.7	0.59	0.592	2.77	0.59	0.592	0.07	0.5185185
2.35	0.545	0.548	2.46	0.544	0.548	0.11	0.9361702
1.88	0.495	0.498	1.92	0.494	0.498	0.04	0.4255319
1.56	0.449	0.45	1.57	0.446	0.45	0.01	0.1282051
1.27	0.395	0.396	1.36	0.393	0.396	0.09	1.4173228
0.81	0.33	0.331	0.85	0.33	0.331	0.04	0.9876543
0.561	0.294	0.295	0.59	0.294	0.295	0.029	1.0338681
0.332	0.244	0.245	0.333	0.243	0.245	0.001	0.060241
0.167	0.203	0.204	0.179	0.203	0.204	0.012	1.4371257
0.093	0.15	0.151	0.097	0.15	0.151	0.004	0.8602151

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 10 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์
 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50มิลลิวเทสลา
 ความกว้าง เบสเท่ากับ 40 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
5.35	0.855	0.861	5.72	0.85	0.861	0.37	1.3831776
5.55	0.787	0.792	5.71	0.787	0.792	0.16	0.5765766
4.42	0.722	0.726	4.62	0.721	0.726	0.2	0.9049774
4.35	0.696	0.7	4.43	0.696	0.7	0.08	0.3678161
3.3	0.637	0.642	3.47	0.637	0.642	0.17	1.030303
3.32	0.606	0.609	3.4	0.605	0.609	0.08	0.4819277
2.68	0.538	0.54	2.71	0.537	0.54	0.03	0.2238806
2.18	0.495	0.497	2.26	0.494	0.497	0.08	0.733945
1.8	0.447	0.449	1.82	0.445	0.449	0.02	0.2222222
1.38	0.396	0.398	1.41	0.396	0.398	0.03	0.4347826
0.97	0.34	0.341	1.02	0.34	0.341	0.05	1.0309278
0.79	0.296	0.297	0.832	0.296	0.297	0.042	1.0632911

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 11 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์
 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50มิลลิเทสลา
 ความกว้าง เบสเท่ากับ 40 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
7.19	0.792	0.8	7.23	0.791	0.8	0.04	0.1112656
6.84	0.732	0.739	6.87	0.731	0.739	0.03	0.0877193
6.01	0.691	0.697	6.08	0.69	0.697	0.07	0.2329451
5.03	0.613	0.618	5.17	0.612	0.618	0.14	0.55666
4.6	0.556	0.561	4.64	0.556	0.561	0.04	0.173913
3.73	0.494	0.497	3.82	0.493	0.497	0.09	0.4825737
3.28	0.453	0.458	3.29	0.453	0.458	0.01	0.0609756
2.68	0.396	0.398	2.69	0.395	0.398	0.01	0.0746269
1.94	0.336	0.337	2.06	0.334	0.337	0.12	1.2371134
1.51	0.292	0.293	1.57	0.291	0.293	0.06	0.794702
1.16	0.244	0.245	1.18	0.243	0.245	0.02	0.3448276
0.86	0.2	0.2	0.88	0.199	0.2	0.02	0.4651163
0.53	0.153	0.154	0.55	0.153	0.154	0.02	0.754717
0.253	0.10229	0.10248	0.26	0.102	0.10248	0.007	0.5533597

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 12 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50มิลลิเทสลา
ความกว้าง เบสเท่ากับ 40 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
11.07	0.799	0.809	11.12	0.797	0.809	0.05	0.0903342
9.61	0.724	0.732	9.78	0.723	0.732	0.17	0.3537981
9.11	0.686	0.695	9.15	0.686	0.695	0.04	0.0878156
8.34	0.648	0.656	8.49	0.647	0.656	0.15	0.3597122
7.42	0.597	0.604	7.52	0.597	0.604	0.1	0.2695418
6.36	0.541	0.547	6.41	0.54	0.546	0.05	0.1572327
4.64	0.498	0.502	4.7	0.497	0.502	0.06	0.2586207
3.92	0.446	0.449	4.02	0.445	0.449	0.1	0.5102041
3.47	0.392	0.395	3.55	0.392	0.395	0.08	0.4610951
2.78	0.35	0.352	2.84	0.35	0.352	0.06	0.4316547
2.08	0.294	0.296	2.11	0.293	0.296	0.03	0.2884615
1.48	0.243	0.245	1.52	0.243	0.245	0.04	0.5405405
1.2	0.196	0.197	1.22	0.196	0.197	0.02	0.3333333
0.75	0.15	0.151	0.8	0.15	0.151	0.05	1.3333333
0.47	0.09986	0.10024	0.48	0.09982	0.10024	0.01	0.4255319

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 13 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 150 มิลลิเทสลา
ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
3.22	0.801	0.803	3.256	0.8	0.803	0.036	0.0745342
3.156	0.749	0.752	3.179	0.748	0.752	0.023	0.0485847
3.11	0.714	0.716	3.122	0.713	0.716	0.012	0.0257235
2.92	0.64	0.643	2.928	0.64	0.643	0.008	0.0182648
2.81	0.599	0.601	2.82	0.598	0.601	0.01	0.0237248
2.666	0.544	0.5468	2.67	0.544	0.5468	0.004	0.0100025
2.519	0.49	0.492	2.525	0.49	0.492	0.006	0.0158793
2.367	0.44	0.442	2.37	0.439	0.442	0.003	0.0084495
2.242	0.399	0.401	2.247	0.398	0.401	0.005	0.0148677
2.085	0.348	0.35	2.09	0.347	0.35	0.005	0.0159872
1.897	0.292	0.294	1.899	0.291	0.294	0.002	0.0070286
1.705	0.242	0.243	1.707	0.241	0.243	0.002	0.0078201
1.523	0.1989	0.2	1.525	0.198	0.2	0.002	0.0087547
1.259	0.1479	0.149	1.261	0.1478	0.149	0.002	0.0105904
0.511	0.05941	0.05987	0.514	0.05941	0.05987	0.003	0.0391389

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 14 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 250 มิลลิเทสลา
ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก			Delta IC(uA)	Sr(1/T)
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)		
3.26	0.8	0.803	3.295	0.798	0.803	0.035	0.0429448
3.17	0.748	0.75	3.197	0.747	0.75	0.027	0.0340694
3.11	0.714	0.719	3.13	0.714	0.719	0.02	0.0257235
2.94	0.648	0.652	2.96	0.649	0.652	0.02	0.0272109
2.85	0.608	0.61	2.865	0.607	0.61	0.015	0.0210526
2.67	0.546	0.548	2.69	0.545	0.548	0.02	0.0299625
2.55	0.506	0.508	2.572	0.505	0.508	0.022	0.0345098
2.4	0.452	0.454	2.41	0.45	0.454	0.01	0.0166667
2.226	0.394	0.395	2.23	0.393	0.395	0.004	0.0071878
2.048	0.339	0.341	2.057	0.339	0.341	0.009	0.0175781
1.91	0.299	0.3	1.919	0.298	0.3	0.009	0.0188482
1.708	0.2459	0.2474	1.714	0.2458	0.2474	0.006	0.0140515
1.503	0.1975	0.1988	1.506	0.1973	0.1988	0.003	0.007984
1.266	0.15	0.151	1.267	0.15	0.151	0.001	0.0031596
0.909	0.09886	0.099696	0.91	0.09883	0.099696	0.001	0.0044004
0.504	0.05945	0.05991	0.505	0.05945	0.05991	0.001	0.0079365

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 15 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 500 มิลลิเทสลา
ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก			Delta IC(uA)	Sr(1/T)
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)		
3.37	0.807	0.809	3.415	0.801	0.809	0.045	0.0267062
3.24	0.752	0.754	3.284	0.751	0.754	0.044	0.0271605
3.136	0.704	0.706	3.16	0.702	0.706	0.024	0.0153061
2.98	0.656	0.654	3.03	0.655	0.654	0.05	0.033557
2.83	0.595	0.595	2.86	0.594	0.595	0.03	0.0212014
2.688	0.543	0.545	2.714	0.542	0.545	0.026	0.0193452
2.55	0.494	0.497	2.576	0.495	0.497	0.026	0.0203922
2.293	0.408	0.41	2.317	0.408	0.41	0.024	0.0209333
2.109	0.351	0.352	2.125	0.35	0.352	0.016	0.0151731
1.93	0.2994	0.301	1.948	0.299	0.301	0.018	0.0186528
1.73	0.2475	0.249	1.746	0.247	0.249	0.016	0.0184971
1.52	0.1987	0.2	1.535	0.1986	0.2	0.015	0.0197368
1.26	0.1488	0.15	1.269	0.148	0.15	0.009	0.0142857
0.912	0.09961	0.1004	0.919	0.09957	0.1004	0.007	0.0153509
0.505	0.05943	0.05989	0.507	0.05943	0.05989	0.002	0.0079208

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 16 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์
 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 150 มิลลิเทสลา
 ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
4.096	0.904	0.906	4.125	0.901	0.906	0.029	0.0472005
3.975	0.843	0.846	4.002	0.842	0.846	0.027	0.045283
3.87	0.805	0.809	3.9	0.803	0.809	0.03	0.0516796
3.73	0.748	0.751	3.75	0.746	0.751	0.02	0.0357462
3.595	0.6974	0.7	3.6	0.695	0.7	0.005	0.0092721
3.438	0.64	0.643	3.45	0.639	0.643	0.012	0.0232693
3.32	0.601	0.604	3.345	0.603	0.604	0.025	0.0502008
3.172	0.552	0.555	3.193	0.551	0.555	0.021	0.0441362
3.029	0.5023	0.5049	3.043	0.503	0.5049	0.014	0.0308132
2.85	0.448	0.45	2.864	0.448	0.45	0.014	0.0327485
2.687	0.399	0.401	2.7	0.399	0.401	0.013	0.0322541
2.49	0.343	0.345	2.502	0.343	0.345	0.012	0.0321285
2.107	0.245	0.247	2.11	0.245	0.247	0.003	0.0094922
1.884	0.197	0.199	1.888	0.197	0.199	0.004	0.0141543
1.62	0.149	0.15	1.625	0.1492	0.15	0.005	0.0205761
1.259	0.0987	0.09988	1.262	0.0987	0.09988	0.003	0.0158856
0.846	0.05913	0.05994	0.849	0.05914	0.05994	0.003	0.0236407

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 17 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 250 มิลลิเทสลา
ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
4.09	0.904	0.907	4.14	0.902	0.907	0.05	0.0488998
3.996	0.845	0.849	4.04	0.844	0.849	0.044	0.044044
3.93	0.806	0.809	3.96	0.805	0.809	0.03	0.0305344
3.757	0.742	0.745	3.78	0.741	0.745	0.023	0.0244876
3.644	0.703	0.706	3.67	0.7	0.706	0.026	0.0285401
3.19	0.545	0.547	3.21	0.543	0.547	0.02	0.0250784
3.05	0.5	0.503	3.07	0.499	0.503	0.02	0.0262295
2.87	0.444	0.447	2.887	0.443	0.447	0.017	0.0236934
2.71	0.395	0.398	2.72	0.395	0.398	0.01	0.0147601
2.536	0.347	0.349	2.547	0.346	0.349	0.011	0.0173502
2.358	0.299	0.3	2.366	0.298	0.3	0.008	0.0135708
2.134	0.2449	0.246	2.139	0.244	0.246	0.005	0.0093721
1.917	0.1997	0.201	1.928	0.1995	0.201	0.011	0.0229525
1.646	0.1495	0.151	1.65	0.1494	0.151	0.004	0.0097205
1.275	0.09838	0.09955	1.279	0.09835	0.09955	0.004	0.012549
0.86	0.05908	0.0599	0.861	0.05908	0.0599	0.001	0.0046512

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 18 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 500 มิลลิเทสลา
ความกว้าง เบลเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
3.837	0.913	0.917	4.008	0.904	0.917	0.171	0.0891321
3.932	0.841	0.844	4.02	0.84	0.844	0.088	0.0447609
3.901	0.804	0.807	3.973	0.803	0.807	0.072	0.0369136
3.76	0.745	0.748	3.806	0.741	0.748	0.046	0.0244681
3.604	0.697	0.7	3.65	0.695	0.7	0.046	0.0255272
3.53	0.668	0.671	3.59	0.667	0.671	0.06	0.0339943
3.31	0.595	0.599	3.363	0.594	0.599	0.053	0.0320242
3.156	0.55	0.553	3.216	0.55	0.553	0.06	0.0380228
2.96	0.49	0.492	3.01	0.47	0.492	0.05	0.0337838
2.82	0.44	0.443	2.86	0.44	0.443	0.04	0.0283688
2.629	0.382	0.384	2.659	0.381	0.384	0.03	0.0228224
2.477	0.338	0.34	2.499	0.338	0.34	0.022	0.0177634
2.297	0.291	0.293	2.317	0.29	0.293	0.02	0.017414
1.897	0.1965	0.1982	1.91	0.1964	0.1982	0.013	0.0137059
1.64	0.149	0.15	1.65	0.149	0.15	0.01	0.0121951
1.28	0.09899	0.10018	1.29	0.09895	0.10018	0.01	0.015625
0.867	0.059077	0.05989	0.87	0.05906	0.05989	0.003	0.0069204

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 19 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 150มิลลิเทสลา
ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
5.019	0.796	0.8	5.034	0.743	0.8	0.015	0.0199243
4.87	0.745	0.75	4.898	0.74	0.75	0.028	0.0383299
4.69	0.697	0.7	4.71	0.696	0.7	0.02	0.0284293
4.53	0.648	0.652	4.56	0.65	0.652	0.03	0.0441501
4.32	0.595	0.602	4.343	0.595	0.602	0.023	0.0354938
4.12	0.544	0.548	4.142	0.54	0.548	0.022	0.0355987
3.935	0.5	0.503	3.954	0.499	0.503	0.019	0.0321898
3.727	0.447	0.451	3.74	0.445	0.451	0.013	0.0232537
3.478	0.389	0.392	3.494	0.389	0.392	0.016	0.030669
3.253	0.341	0.344	3.266	0.341	0.344	0.013	0.0266421
3	0.29	0.293	3.02	0.29	0.293	0.02	0.0444444
2.76	0.2435	0.246	2.763	0.2435	0.246	0.003	0.0072464
2.49	0.196	0.199	2.498	0.197	0.199	0.008	0.021419
2.163	0.1478	0.1498	2.17	0.1477	0.1498	0.007	0.021575
1.285	0.058	0.059	1.287	0.057	0.059	0.002	0.0103761

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 20 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 250มิลลิเทสลา
ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
4.99	0.741	0.749	5.05	0.739	0.749	0.06	0.0480962
4.604	0.703	0.707	4.65	0.701	0.707	0.046	0.0399652
4.36	0.635	0.639	4.68	0.634	0.639	0.32	0.293578
4.16	0.554	0.558	4.216	0.554	0.558	0.056	0.0538462
3.93	0.497	0.5	3.98	0.492	0.5	0.05	0.0508906
3.71	0.441	0.445	3.73	0.441	0.445	0.02	0.0215633
3.51	0.397	0.4	3.55	0.394	0.4	0.04	0.045584
3.3	0.346	0.349	3.328	0.346	0.349	0.028	0.0339394
3.06	0.296	0.299	3.08	0.292	0.299	0.02	0.0261438
2.81	0.247	0.25	2.82	0.247	0.25	0.01	0.0142349
2.517	0.198	0.2	2.53	0.198	0.2	0.013	0.0206595

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 21 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 500 มิลลิเทสลา
ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
5	0.806	0.81	5.11	0.8	0.81	0.11	0.044
4.94	0.738	0.742	5.02	0.665	0.742	0.08	0.0323887
4.92	0.695	0.701	5	0.636	0.701	0.08	0.0325203
4.88	0.551	0.556	4.9	0.485	0.556	0.02	0.0081967
4.396	0.531	0.535	4.48	0.532	0.535	0.084	0.0382166
4.087	0.452	0.455	4.367	0.45	0.455	0.28	0.1370198
3.75	0.396	0.4	3.847	0.392	0.4	0.097	0.0517333
3.4	1.345	0.348	3.404	0.341	0.348	0.004	0.0023529
3.12	0.297	0.3	3.24	0.295	0.3	0.12	0.0769231
2.907	0.246	0.249	2.913	0.237	0.249	0.006	0.004128
2.57	0.195	0.197	2.59	0.195	0.197	0.02	0.0155642
2.212	0.146	0.148	2.224	0.145	0.148	0.012	0.0108499
1.784	0.09851	0.1002	1.9	0.09831	0.1002	0.116	0.1300448
1.325	0.0583	0.05979	1.328	0.0583	0.05979	0.003	0.0045283

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 22 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์
 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 150 มิลลิเทสลา
 ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
5.23	0.621	0.627	5.38	0.62	0.627	0.15	0.1912046
5.28	0.6	0.605	5.3	0.598	0.605	0.02	0.0252525
5.012	0.537	0.542	5.05	0.51	0.542	0.038	0.0505454
4.88	0.507	0.511	4.91	0.504	0.511	0.03	0.0409836
4.67	0.46	0.465	4.7	0.457	0.465	0.03	0.0428266
4.39	0.397	0.401	4.416	0.378	0.401	0.026	0.0394837
4.185	0.357	0.361	4.2	0.357	0.361	0.015	0.0238949
3.92	0.257	0.261	3.937	0.25	0.261	0.017	0.0289116
3.63	0.206	0.21	3.64	0.206	0.21	0.01	0.0183655
3.42	0.148	0.15	3.423	0.145	0.15	0.003	0.005848
2.88	0.103	0.106	2.887	0.101	0.106	0.007	0.0162037
2.707	0.09188	0.09451	2.71	0.09188	0.09451	0.003	0.0073883
2.116	0.05795	0.06003	2.117	0.05795	0.06003	0.001	0.0031506

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 23 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 250 มิลลิเทสลา
ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
5.456	0.729	0.734	5.51	0.725	0.734	0.054	0.0395894
5.401	0.711	0.716	5.46	0.71	0.716	0.059	0.0436956
5.253	0.666	0.671	5.317	0.664	0.671	0.064	0.0487341
5.003	0.5977	0.602	5.04	0.5972	0.602	0.037	0.0295823
4.803	0.55	0.555	4.849	0.548	0.555	0.046	0.0383094
4.702	0.455	0.458	4.746	0.442	0.458	0.044	0.0374309
4.48	0.405	0.41	4.515	0.4	0.41	0.035	0.03125
4.21	0.354	0.358	4.23	0.35	0.358	0.02	0.0190024
3.92	0.3	0.304	3.94	0.298	0.304	0.02	0.0204082
3.64	0.256	0.26	3.67	0.252	0.26	0.03	0.032967
3.32	0.207	0.21	3.34	0.204	0.21	0.02	0.0240964
2.9	0.152	0.155	2.914	0.15	0.155	0.014	0.0193103
2.46	0.105	0.108	2.47	0.103	0.108	0.01	0.0162602
1.834	0.05832	0.06011	1.843	0.0583	0.06011	0.009	0.0196292

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 24 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 500 มิลลิเทสลา
ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
5.73	0.898	0.904	5.86	0.895	0.904	0.13	0.0453752
5.63	0.869	0.874	5.75	0.83	0.874	0.12	0.0426288
5.65	0.7	0.705	5.67	0.612	0.705	0.02	0.0070796
5.57	0.617	0.622	5.62	0.611	0.622	0.05	0.0179533
5.34	0.76	765	5.47	0.758	765	0.13	0.0486891
5.16	0.714	0.719	5.25	0.706	0.719	0.09	0.0348837
4.92	0.642	0.647	5.02	0.638	0.647	0.1	0.0406504
4.81	0.607	0.612	4.92	0.604	0.612	0.11	0.045738
4.56	0.538	0.542	4.65	0.529	0.542	0.09	0.0394737
4.44	0.505	0.509	4.53	0.503	0.509	0.09	0.0405405
4.35	0.422	0.406	4.37	0.403	0.406	0.02	0.0091954
4	0.356	0.36	4.05	0.351	0.36	0.05	0.025
3.66	0.291	0.294	3.716	0.29	0.294	0.056	0.0306011
3.45	0.253	0.257	3.49	0.253	0.257	0.04	0.0231884
3.18	0.207	0.21	3.21	0.207	0.21	0.03	0.0188679
2.86	0.154	0.157	2.9	0.155	0.157	0.04	0.027972
2.43	0.106	0.108	2.453	0.106	0.108	0.023	0.01893

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

อุปกรณ์ประกอบการวัด

การเตรียมอุปกรณ์เพื่อทำการวัด

ในการทำการวัดและทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ให้กับแมกนีโตทรานซิสเตอร์นั้นจำเป็นต้องมีการออกแบบอุปกรณ์ต่อร่วมเพื่อความสะดวกในการวัด และป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกเนื่องมาจากสัญญาณรบกวน ได้ทำการออกแบบดังนี้

กล่องสำหรับใช้ใส่แมกนีโตทรานซิสเตอร์

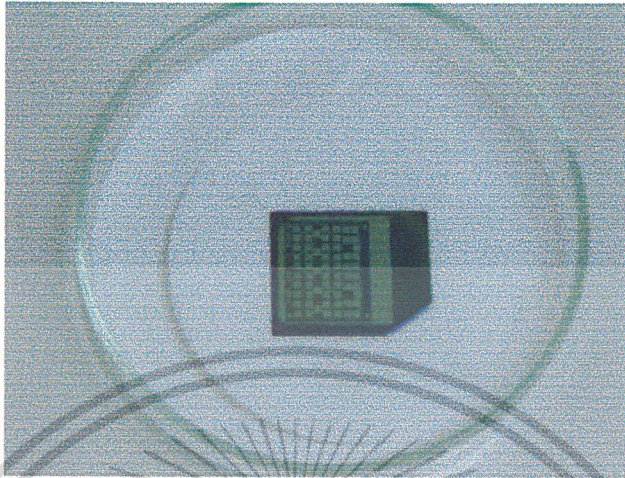
กล่องที่ใช้ทำการวัดมีลักษณะดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงภาพกล่องป้องกันสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิกอนที่บรรจุอุปกรณ์อยู่เพื่อทำการวัดคุณสมบัติของรอยต่อ



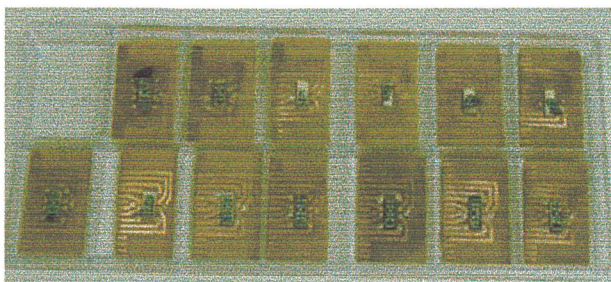
รูปที่ 2 แสดงชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้ว

แผ่นปริ้นซ์ที่ใช้สำหรับรองรับตัวเมกนีโตทรานซิสเตอร์ เพื่อต่อเข้ากับกล่อง
แผ่นวงจรที่ใช้ในการต่อขาของอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จแล้วมีลักษณะดังนี้



รูปที่ 3 แสดงแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับเพื่อความสะดวกในการต่อขาภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 แผ่นวงจรที่ใช้ต่อขา LMT

อุปกรณ์ควมคุมกระแสควบคุมกระแส



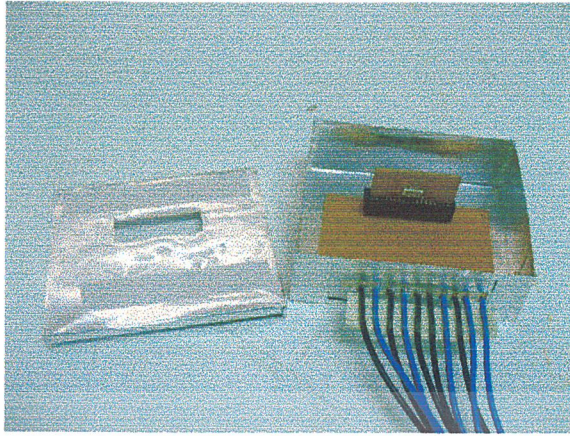
รูปที่ 5 แสดงภาพกล่องวงจรควบคุมกระแสคงที่

วิธีการทดลอง

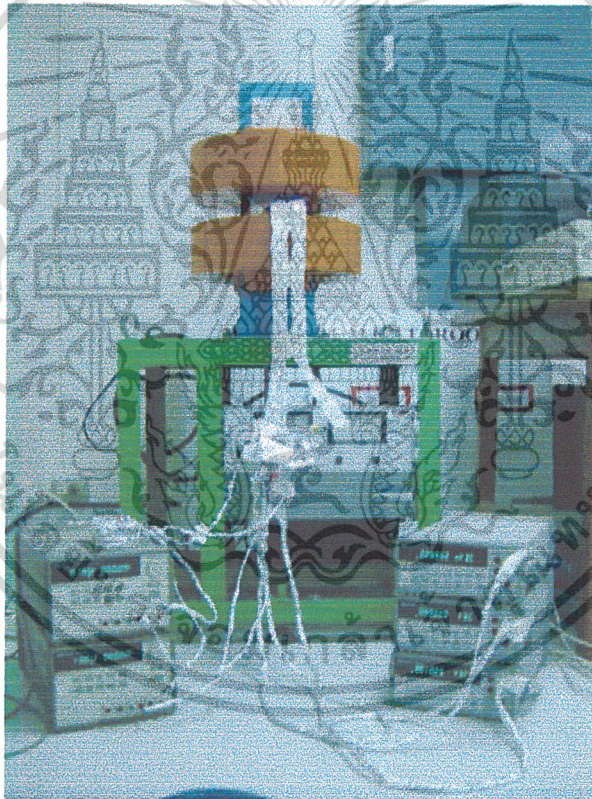
ทำการต่อขาของแมกนีโตทรานซิสเตอร์กับอุปกรณ์ต่อภายนอก

ในการทดลองที่ได้ใช้การต่อขาแบบตั้งกับแผ่นปริ้นซ์เพื่อนำไปเสียบต่อในกล่องซึ่งได้เลยเพื่อความสะดวก การต่อทำดังรูปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 แสดงภาพกล่องต่อวงจร และป้องกันสัญญาณรบกวน

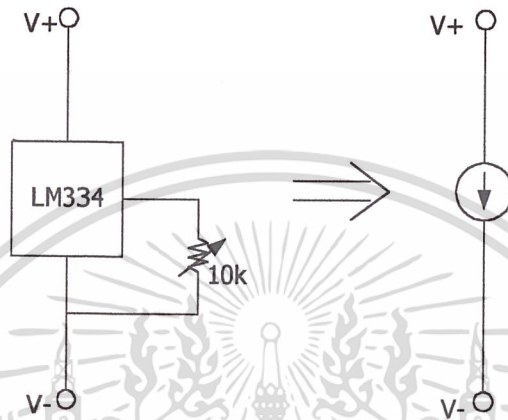


รูปที่ 7 แสดงการติดตั้งเพื่อการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก

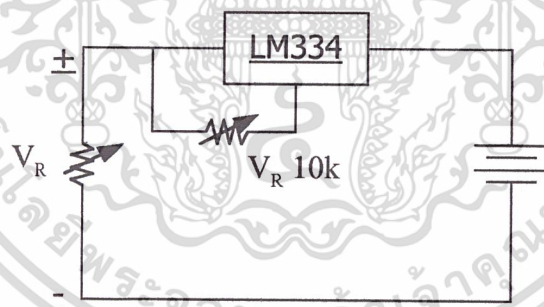
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
วิธีการและขั้นตอนการวัด

การออกแบบและทดสอบวงจรควบคุมกระแส

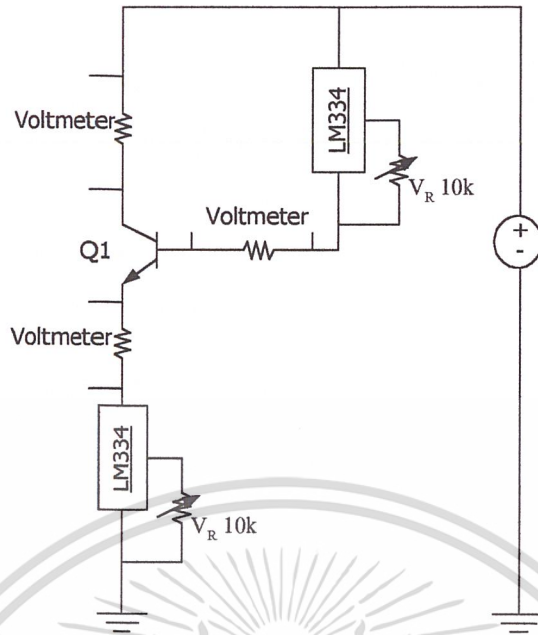


รูปที่ 8 แสดงวงจรสมมูลและสัญลักษณ์ IC ควบคุมกระแส



รูปที่ 9 แสดงวงจรทดสอบ IC ควบคุมกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 แสดงการต่อวงจรควบคุมกระแสเพื่อทดสอบการไบอัสกลับ n-p-n ทรานซิสเตอร์

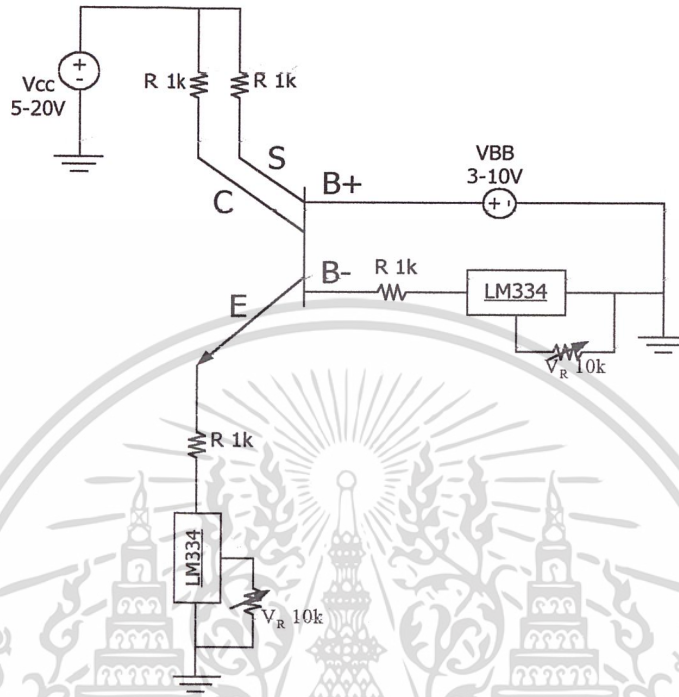
ตารางที่ 25 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบวงจรควบคุมกระแสกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ n-p-n

VCC(V)	IE (A)	IB (uA)	IC (A)	VCB (V)	VC(V)	VB(V)	VE(V)	VBE(V)	VCE(V)
9.982	9.96u	6.565	3.41u	-8.81	9.977	1.154	0.6	0.551	9.372
9.982	6.223u	3.898	2.32u	-0.092	9.9789	5.89	5.24	0.515	3.59
19.976	1.484m	6.562	1.488m	-15.02	18.49	3.468	2.256	1.19	16.215
19.976	0.955m	6.564	0.955m	-13.85	19.012	5.05	3.942	1.0929	15.032
19.976	0.508m	6.566	0.502	-12.87	19.47	6.55	5.61	0.976	13.84
19.976	0.104m	6.565u	98.91u	-11.25	19.875	8.53	7.55	0.7659	12.119
19.976	33.88u	6.563	27.361u	-10.55	19.947	9.38	8.82	0.6504	11.18
19.977	12.241u	6.305u	5.949u	-6.54	19.969	11.3	10.8	0.566	7.72
19.977	7.085u	4.207	2.864u	-1.116	19.972	14.99	14.54	0.525	4.085

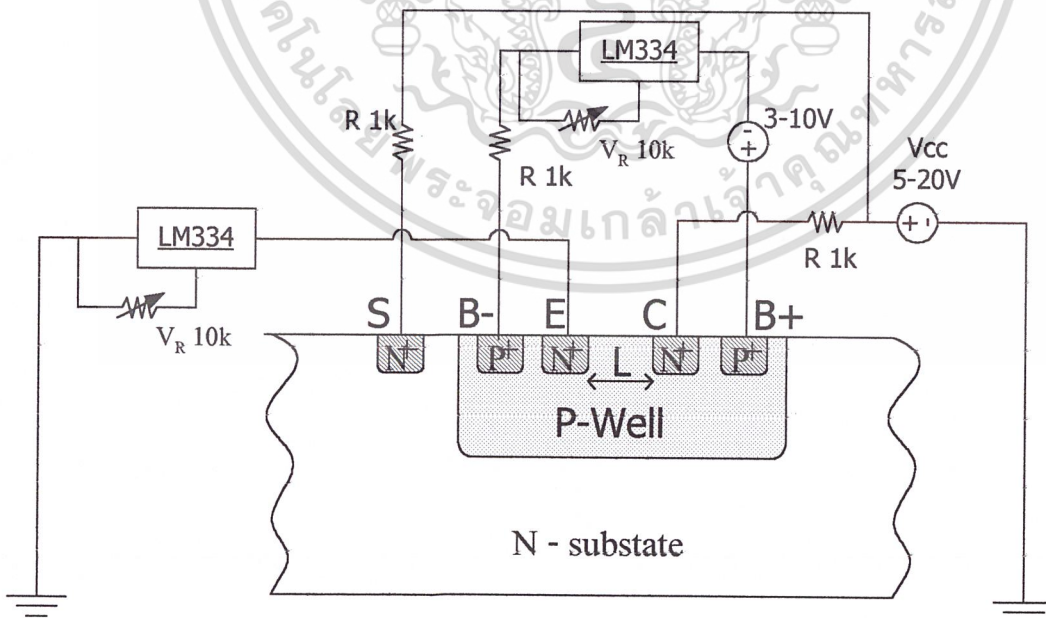
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไบอัสไฟฟ้ากระแสตรง

ต่อวงจรตามรูปที่ 11 และ รูปที่ 12



รูปที่ 11 แสดงภาพสัญลักษณ์ต่อวงจรไบอัสให้กับเม็กนีโคทรานซิสเตอร์

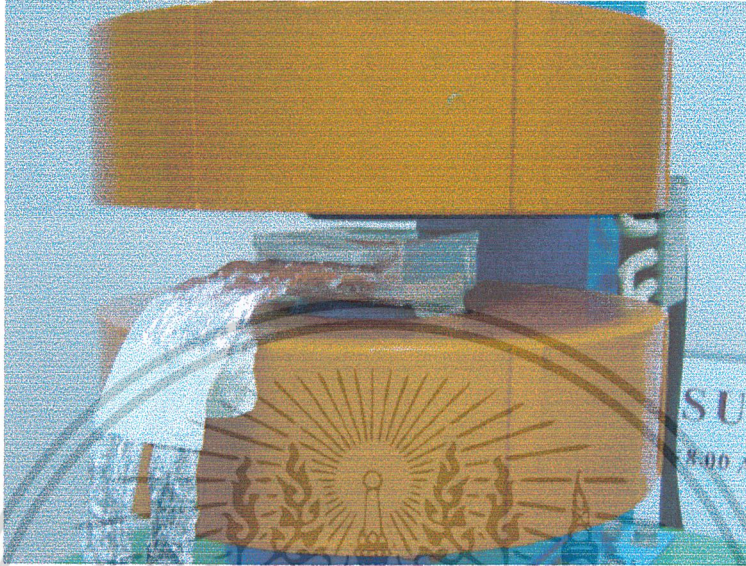


รูปที่ 12 แสดงภาพการต่อวงจรไบอัสให้กับเม็กนีโคทรานซิสเตอร์

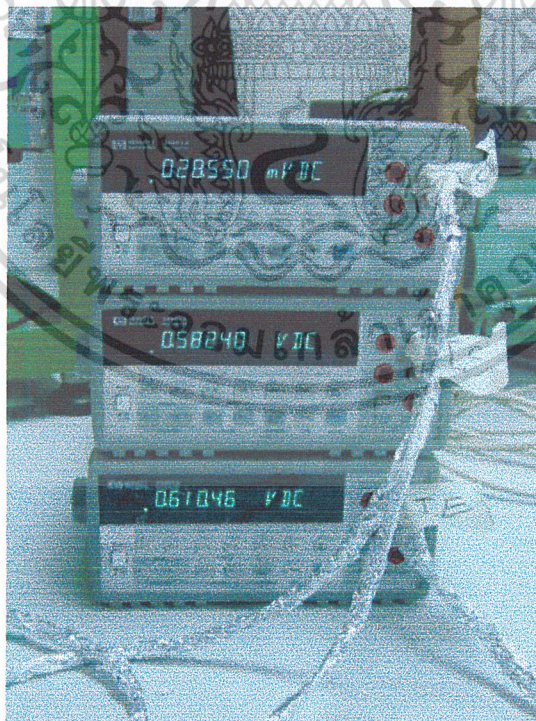
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบกับสนามแม่เหล็ก

นำเม็ทนีโตทรานซิสเตอร์ที่ไบอัสกระแสตรงแล้วไปทดสอบกับสนามแม่เหล็กกับเครื่องกำเนิดสัญญาณแม่เหล็ก



รูปที่ 13 แสดงภาพการติดตั้งกับเครื่องกำเนิดสัญญาณแม่เหล็ก



รูปที่ 14 แสดงภาพมิเตอร์ที่แสดงผลการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
ค่าคงที่ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ

n_i :	ความเข้มข้นอะตอมสารเจืออินทรินสิกที่ 300k (Intrinsic concentration)	1.43x10 ¹⁰ Atom/cm ³
k :	ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's constant)	8.617x10 ⁻¹⁵ eV/K
q :	ประจุของอิเล็กตรอนหรือโฮล	1.602x10 ⁻¹⁹ Coulom

แสดงวิธีการคำนวณต่างๆสำหรับรอยต่อพี-เอ็น

1.หาแรงดันภายในของรอยต่อพี-เอ็น

ค่า Resistivity $P_p = 41.2\Omega - cm.$

คำนวณหา N_A ที่ P-Well ได้

$$N_A = \frac{1}{\rho_p \times q \times \mu_p} = \frac{1}{41.2 \times 1.602 \times 10^{-19} \times 477}$$

$$N_A = 3.18 \times 10^{14} cm^{-3}$$

ค่า Resistivity $P_{p^+} = 3.6\Omega - cm.$

คำนวณหา N_A ที่ P⁺ ได้

$$N_A = \frac{1}{\rho_p \times q \times \mu_p} = \frac{1}{3.6 \times 1.602 \times 10^{-19} \times 477}$$

$$N_A = 3.6 \times 10^{15} cm^{-3}$$

ค่า Resistivity $P_n^+ = 0.88\Omega - cm.$

คำนวณหา N_D ที่ N⁺ ได้

$$N_D = \frac{1}{\rho_p \times q \times \mu_p} = \frac{1}{0.88 \times 1.602 \times 10^{-19} \times 1350}$$

$$N_D = 1.4 \times 10^{16} cm^{-3}$$

ดังนั้น คำนวณค่าแรงดันภายใน ได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{bi} = \frac{KT}{q} \ln \left[\frac{N_D \cdot N_A}{ni^2} \right]$$

$$V_{bi} = 0.0259 \ln \left[\frac{1.4 \times 10^{16} \times 3.6 \times 10^{15}}{(1.43 \times 10^{10})^2} \right]$$

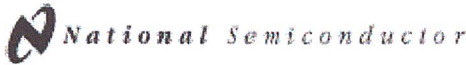
$$V_{bi} = 0.679 \text{ V.}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

รายละเอียด IC LM334



March 2000

LM134/LM234/LM334
3-Terminal Adjustable Current Sources

General Description

The LM134/LM234/LM334 are 3-terminal adjustable current sources featuring 10,000:1 range in operating current, excellent current regulation and a wide dynamic voltage range of 1V to 40V. Current is established with one external resistor and no other parts are required. Initial current accuracy is ±3%. The LM134/LM234/LM334 are true floating current sources with no separate power supply connections. In addition, reverse applied voltages of up to 20V will draw only a few dozen microamperes of current, allowing the devices to act as both a rectifier and current source in AC applications. The sense voltage used to establish operating current in the LM134 is 61mV at 25°C and is directly proportional to absolute temperature (°K). The simplest one external resistor connection, then, generates a current with $\pm 0.33\%/^{\circ}\text{C}$ temperature dependence. Zero drift operation can be obtained by adding one extra resistor and a diode.

Applications for the current sources include bias networks, surge protection, low power reference, ramp generation,

LED driver, and temperature sensing. The LM234-3 and LM234-6 are specified as true temperature sensors with guaranteed initial accuracy of $\pm 3^{\circ}\text{C}$ and $\pm 6^{\circ}\text{C}$, respectively. These devices are ideal in remote sense applications because series resistance in long wire runs does not affect accuracy. In addition, only 2 wires are required.

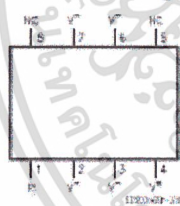
The LM134 is guaranteed over a temperature range of -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$, the LM234 from -25°C to $+100^{\circ}\text{C}$ and the LM334 from 0°C to $+70^{\circ}\text{C}$. These devices are available in TO-46 hermetic, TO-92 and SO-8 plastic packages.

Features

- Operates from 1V to 40V
- 0.02% current regulation
- Programmable from 1 μA to 10mA
- True 2-terminal operation
- Available as fully specified temperature sensor
- ±3% initial accuracy

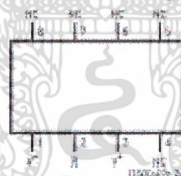
Connection Diagrams

SO-8 Surface Mount Package



Order Number LM334M or LM334MX
See NS Package Number M08A

SO-8 Alternative Pinout Surface Mount Package



Order Number LM334SM or LM334SMX
See NS Package Number M08A

TO-46 Metal Can Package



V₊ Pin is electrically connected to case.
Bottom View
Order Number LM134H, LM234H or LM334H
See NS Package Number H03H

TO-92 Plastic Package



Bottom View
Order Number LM334Z, LM234Z-3 or LM234Z-6
See NS Package Number Z03A

LM134/LM234/LM334 3-Terminal Adjustable Current Sources

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM134/LM234/LM334

Absolute Maximum Ratings (Note 1)		LM234/LM234-3/LM234-6	-25°C to +100°C	
If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.		LM334	0°C to +70°C	
V ⁺ to V ⁻ Forward Voltage			Soldering Information	
LM134/LM234/LM334	40V		TO-92 Package (10 sec.)	260°C
LM234-3/LM234-6	30V		TO-46 Package (10 sec.)	300°C
V ⁺ to V ⁻ Reverse Voltage	20V		SO Package	
R Pin to V ⁻ Voltage	5V		Vapor Phase (60 sec.)	215°C
Set Current	10 mA		Infrared (15 sec.)	220°C
Power Dissipation	400 mW		See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" (Appendix D) for other methods of soldering surface mount devices.	
ESD Susceptibility (Note 6)	2000V			
Operating Temperature Range (Note 5)				
LM134	-55°C to +125°C			

Electrical Characteristics (Note 2)								
Parameter	Conditions	LM134/LM234			LM334			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Set Current Error, V ⁺ = 2.5V (Note 3)	10µA ≤ I _{SET} ≤ 1mA			3			6	%
	1mA < I _{SET} ≤ 5mA			5			8	%
	2µA ≤ I _{SET} ≤ 10µA			8			12	%
Ratio of Set Current to Bias Current	100µA ≤ I _{SET} ≤ 1mA	14	18	23	14	18	26	
	1mA < I _{SET} ≤ 5mA		14			14		
	2µA ≤ I _{SET} ≤ 100µA		18	23		18	26	
Minimum Operating Voltage	2µA ≤ I _{SET} ≤ 100µA		0.6			0.8		V
	100µA < I _{SET} ≤ 1mA		0.9			0.9		V
	1mA < I _{SET} ≤ 5mA		1.0			1.0		V
Average Change in Set Current with Input Voltage	2µA ≤ I _{SET} ≤ 1mA							%/V
	1.5 ≤ V ⁺ ≤ 5V		0.02	0.05		0.02	0.1	%/V
	6V ≤ V ⁺ ≤ 40V		0.01	0.03		0.01	0.05	%/V
	1mA < I _{SET} ≤ 5mA							%/V
	1.5V ≤ V ⁺ ≤ 5V		0.03			0.03		%/V
5V ≤ V ⁺ ≤ 40V		0.02			0.02		%/V	
Temperature Dependence of Set Current (Note 4)	25µA ≤ I _{SET} ≤ 1mA	0.96T	T	1.04T	0.96T	T	1.04T	
Effective Shunt Capacitance			15			15		pF

Note 1: "Absolute Maximum Ratings" indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not guarantee specific performance levels.

Note 2: Unless otherwise specified, tests are performed at T_J = 25°C with pulse testing so that junction temperature does not change during test.

Note 3: Set current is the current flowing into the V⁺ pin. For the Basic 2-Terminal Current Source circuit shown on the first page of this data sheet, I_{SET} is determined by the following formula: I_{SET} = 67.7 mA/V_{SET} (± 25.0%) Set current error is expressed as a percent deviation from this amount. I_{SET} here uses at 0.3333V, T_J = 25°C (227 µV/°C).

Note 4: I_{SET} is directly proportional to absolute temperature (K). I_{SET} at any temperature can be calculated from I_{SET} = I_{SET}(T_J) where I_{SET} is I_{SET} measured at T_J (°K).

Note 5: For elevated temperature operation, T_J max is:

LM134	150°C
LM234	125°C
LM334	100°C

Thermal Resistance	TO-92	TO-46	SO-8
θ _{JA} (Junction to Ambient)	180°C/W (0.4" leads)	440°C/W	165°C/W
	160°C/W (0.125" leads)		
θ _{JC} (Junction to Case)	N/A	32°C/W	80°C/W

Note 6: Human body model, 100pF discharged through a 1.5kΩ resistor.

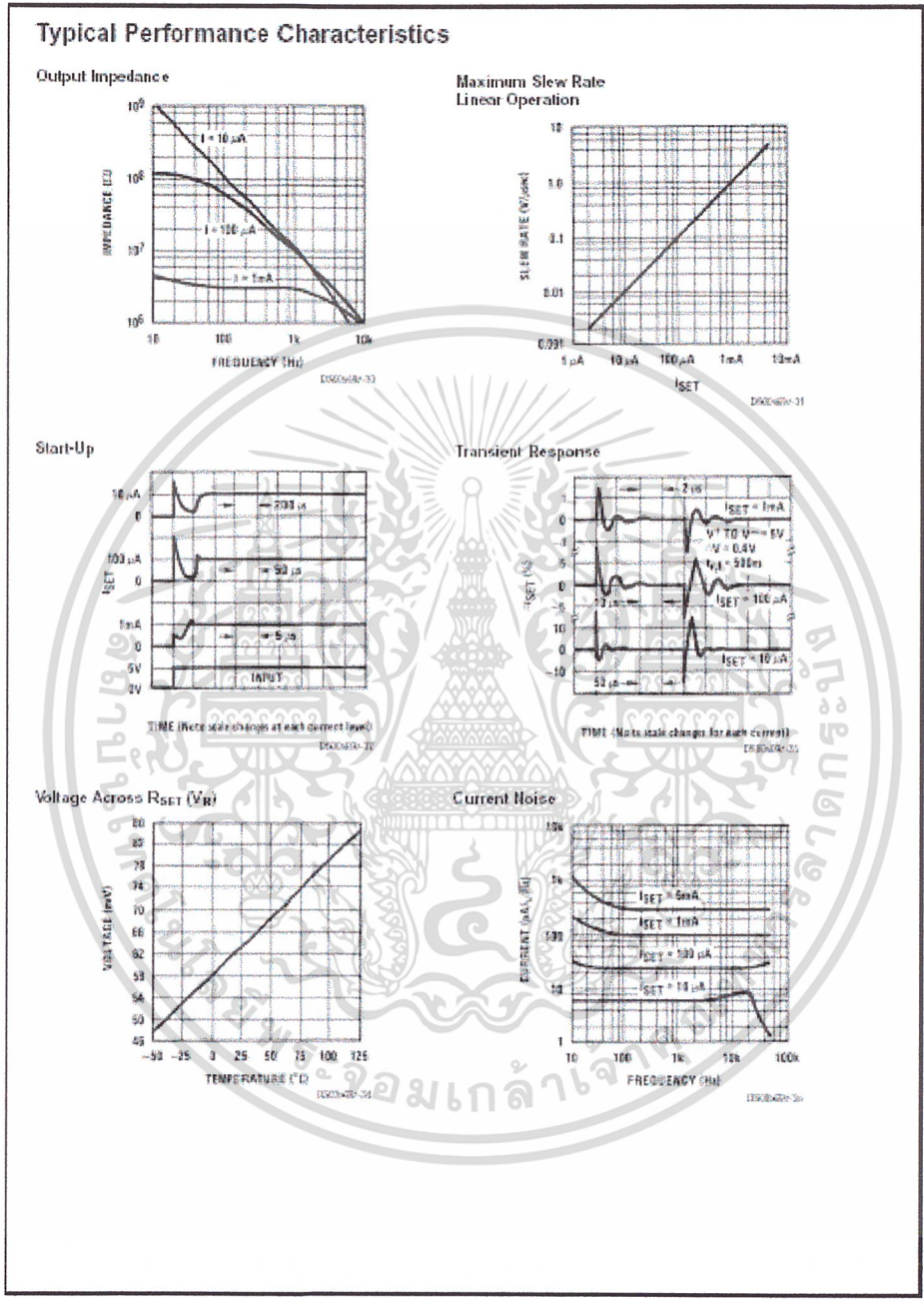
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Characteristics (Note 2)								
Parameter	Conditions	LM234-3			LM234-6			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Set Current Error, $V^+ = 2.5V$, (Note 3)	$100\mu A \leq I_{SET} \leq 1mA$ $T_J = 25^\circ$			± 1			± 2	%
Equivalent Temperature Error				± 3			± 6	$^\circ C$
Ratio of Set Current to Bias Current	$100\mu A \leq I_{SET} \leq 1mA$	14	18	26	14	18	26	
Minimum Operating Voltage	$100\mu A \leq I_{SET} \leq 1mA$		0.9			0.9		V
Average Change in Set Current with Input Voltage	$100\mu A \leq I_{SET} \leq 1mA$ $1.5 \leq V^+ \leq 5V$ $5V \leq V^+ \leq 30V$		0.02 0.01	0.05 0.03		0.02 0.01	0.01 0.05	%/V %/V
Temperature Dependence of Set Current (Note 4) and Equivalent Slope Error	$100\mu A \leq I_{SET} \leq 1mA$	0.981	T	1.021	0.971	T	1.031	
Effective Shunt Capacitance			15			15		pF

LM234/LM234/LM334

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM134/LM234/LM334



www.national.com

4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Application Hints (Continued)

NOISE

Current noise generated by the LM134 is approximately 4 times the shot noise of a transistor. If the LM134 is used as an active load for a transistor amplifier, input referred noise will be increased by about 12dB. In many cases, this is acceptable and a single stage amplifier can be built with a voltage gain exceeding 2000.

LEAD RESISTANCE

The sense voltage which determines operating current of the LM134 is less than 100mV. At this level, thermocouple or lead resistance effects should be minimized by locating the current setting resistor physically close to the device. Sockets should be avoided if possible. It takes only 0.7Ω contact resistance to reduce output current by 1% at the 1mA level.

SENSING TEMPERATURE

The LM134 makes an ideal remote temperature sensor because its current mode operation does not lose accuracy over long wire runs. Output current is directly proportional to absolute temperature in degrees Kelvin, according to the following formula:

$$I_{SET} = \frac{(227 \mu V/K)(T)}{R_{SET}}$$

Calibration of the LM134 is greatly simplified because of the fact that most of the initial inaccuracy is due to a gain term (slope error) and not an offset. This means that a calibration consisting of a gain adjustment only will trim both slope and zero at the same time. In addition, gain adjustment is a one point trim because the output of the LM134 extrapolates to zero at 0K, independent of R_{SET} or any initial inaccuracy.

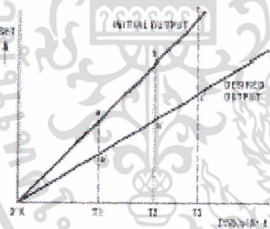


FIGURE 2. Gain Adjustment

This property of the LM134 is illustrated in the accompanying graph. Line abc is the sense current before trimming. Line a'b'c' is the desired output. A gain trim done at T2 will move the output from b to b' and will simultaneously correct the slope so that the output at T1 and T3 will be correct. This gain trim can be done on R_{SET} or on the load resistor used to terminate the LM134. Slope error after trim will normally be less than ±1%. To maintain this accuracy, however, a low temperature coefficient resistor must be used for R_{SET} .

A 33 ppm/°C drift of R_{SET} will give a 1% slope error because the resistor will normally see about the same temperature variations as the LM134. Separating R_{SET} from the LM134 requires 3 wires and has lead resistance problems, so is not normally recommended. Metal film resistors with less than 20 ppm/°C drift are readily available. Wire wound resistors may also be used where best stability is required.

APPLICATION AS A ZERO TEMPERATURE COEFFICIENT CURRENT SOURCE

Adding a diode and a resistor to the standard LM134 configuration can cancel the temperature dependent characteristic of the LM134. The circuit shown in Figure 3 balances the positive tempco of the LM134 (about +0.23 mV/°C) with the negative tempco of a forward-biased silicon diode (about -2.5 mV/°C).

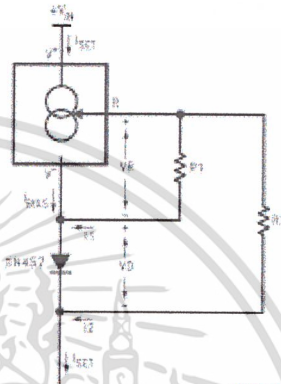


FIGURE 3. Zero Tempco Current Source

The set current (I_{SET}) is the sum of I_1 and I_2 , each contributing approximately 50% of the set current, and I_{BIAS} . I_{BIAS} is usually included in the I_1 term by increasing the V_A value used for calculations by 5.9%. (See CALCULATING R_{SET} .)

$$I_{SET} = I_1 + I_2 + I_{BIAS} \text{ WHERE}$$

$$I_1 = \frac{V_A}{R_1} \text{ and } I_2 = \frac{V_D + V_D}{R_2}$$

The first step is to minimize the tempco of the circuit, using the following equations. An example is given using a value of +227μV/°C as the tempco of the LM134 (which includes the I_{BIAS} component), and -2.5 mV/°C as the tempco of the diode (for best results, this value should be directly measured or obtained from the manufacturer of the diode).

$$I_{SET} = I_1 + I_2$$

$$\frac{dI_{SET}}{dT} = \frac{dI_1}{dT} + \frac{dI_2}{dT}$$

$$= \frac{227 \mu V/°C}{R_1} + \frac{227 \mu V/°C - 2.5 mV/°C}{R_2}$$

$$= 0 \text{ (solve for tempco} = 0)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{2.5 mV/°C - 227 \mu V/°C}{227 \mu V/°C} \approx 10.0$$

With the R_1 to R_2 ratio determined, values for R_1 and R_2 should be determined to give the desired set current. The formula for calculating the set current at $T = 25^\circ C$ is shown below, followed by an example that assumes the forward voltage drop across the diode (V_D) is 0.6V, the voltage across R_1 is 67.7mV (64 mV + 5.9% to account for I_{BIAS}), and $R_2/R_1 = 10$ (from the previous calculations).

Application Hints (Continued)

$$\begin{aligned}
 I_{SET} &= I_1 + I_2 + I_{BIAS} \\
 &= \frac{V_R}{R_1} + \frac{V_R + V_D}{R_2} \\
 &= \frac{67.7 \text{ mV}}{R_1} + \frac{67.7 \text{ mV} + 0.5 \text{ V}}{10.0 R_1} \\
 I_{SET} &\approx \frac{0.134 \text{ V}}{R_1}
 \end{aligned}$$

This circuit will eliminate most of the LM134's temperature coefficient, and it does a good job even if the estimates of the diode's characteristics are not accurate (as the following example will show). For lowest tempco with a specific diode at the desired I_{SET} , however, the circuit should be built and tested over temperature. If the measured tempco of I_{SET} is positive, R_2 should be reduced. If the resulting tempco is negative, R_2 should be increased. The recommended diode for use in this circuit is the 1N457 because its tempco is centered at 11 times the tempco of the LM134, allowing $R_2 = 10 R_1$. You can also use this circuit to create a current source with non-zero tempcos by setting the tempco component of the tempco equation to the desired value instead of 0.

EXAMPLE: A 1mA, Zero-Tempco Current Source
 First, solve for R_1 and R_2 :

$$\begin{aligned}
 I_{SET} &= 1 \text{ mA} = \frac{0.134 \text{ V}}{R_1} \\
 R_1 &= 134 \Omega = 10 R_2 \\
 R_2 &= 13.4 \Omega
 \end{aligned}$$

The values of R_1 and R_2 can be changed to standard 1% resistor values ($R_1 = 133 \Omega$ and $R_2 = 1.33 \text{ k}\Omega$) with less than a 0.75% error.

If the forward voltage drop of the diode was 0.65V instead of the estimate of 0.5V (an error of 20%), the actual set current will be

$$\begin{aligned}
 I_{SET} &= \frac{67.7 \text{ mV}}{R_1} + \frac{67.7 \text{ mV} + 0.65 \text{ V}}{R_2} \\
 &= \frac{67.7 \text{ mV}}{133} + \frac{67.7 \text{ mV} + 0.65 \text{ V}}{1330} \\
 &= 1.049 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

an error of less than 5%.

If the estimate for the tempco of the diode's forward voltage drop was off, the tempco cancellation is still reasonably effective. Assume the tempco of the diode is 2.6mV/°C instead of 2.5mV/°C (an error of 4%). The tempco of the circuit is now:

$$\begin{aligned}
 \frac{dI_{SET}}{dT} &= \frac{dI_1}{dT} + \frac{dI_2}{dT} \\
 &= \frac{227 \mu\text{V}/^\circ\text{C}}{133\Omega} + \frac{227 \mu\text{V}/^\circ\text{C} - 2.6 \text{ mV}/^\circ\text{C}}{1330\Omega} \\
 &= -77 \text{ nA}/^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

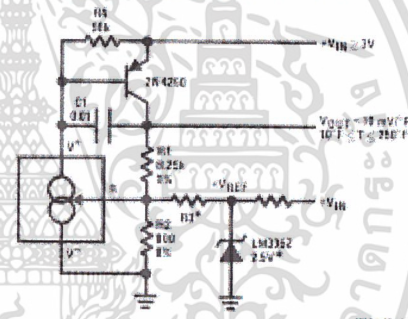
A 1mA LM134 current source with no temperature compensation would have a set resistor of 68Ω and a resulting tempco of

$$\frac{227 \mu\text{V}/^\circ\text{C}}{68\Omega} = 3.3 \mu\text{A}/^\circ\text{C}$$

So even if the diode's tempco varies as much as ±4% from its estimated value, the circuit still eliminates 98% of the LM134's inherent tempco.

Typical Applications

Ground-Referenced Fahrenheit Thermometer



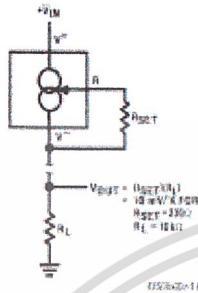
*Select $R_3 = V_{REF}/I_{SET}$. V_{REF} may be any stable positive voltage > 2V from R_3 to calibrate.

DISCONTINUED

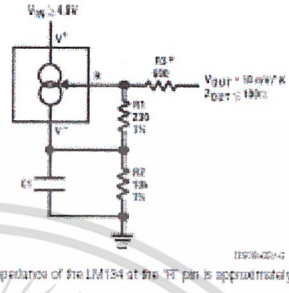
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)

Terminating Remote Sensor for Voltage Output



Low Output Impedance Thermometer

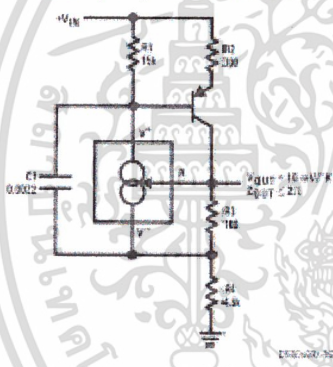


*Output impedance of the LM134 at the "V" pin is approximately

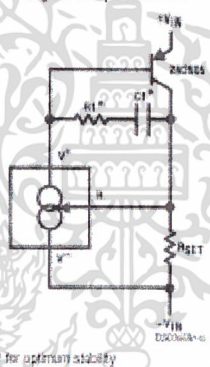
$$= \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

where R_2 is the equivalent external resistance connected from the "V" pin to ground. This output impedance can be reduced by a factor of 5 or more by inserting an equivalent resistor $R_3 = (R_1 R_2)$ in series with the output.

Low Output Impedance Thermometer

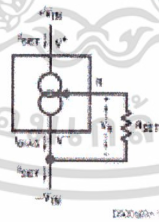


Higher Output Current

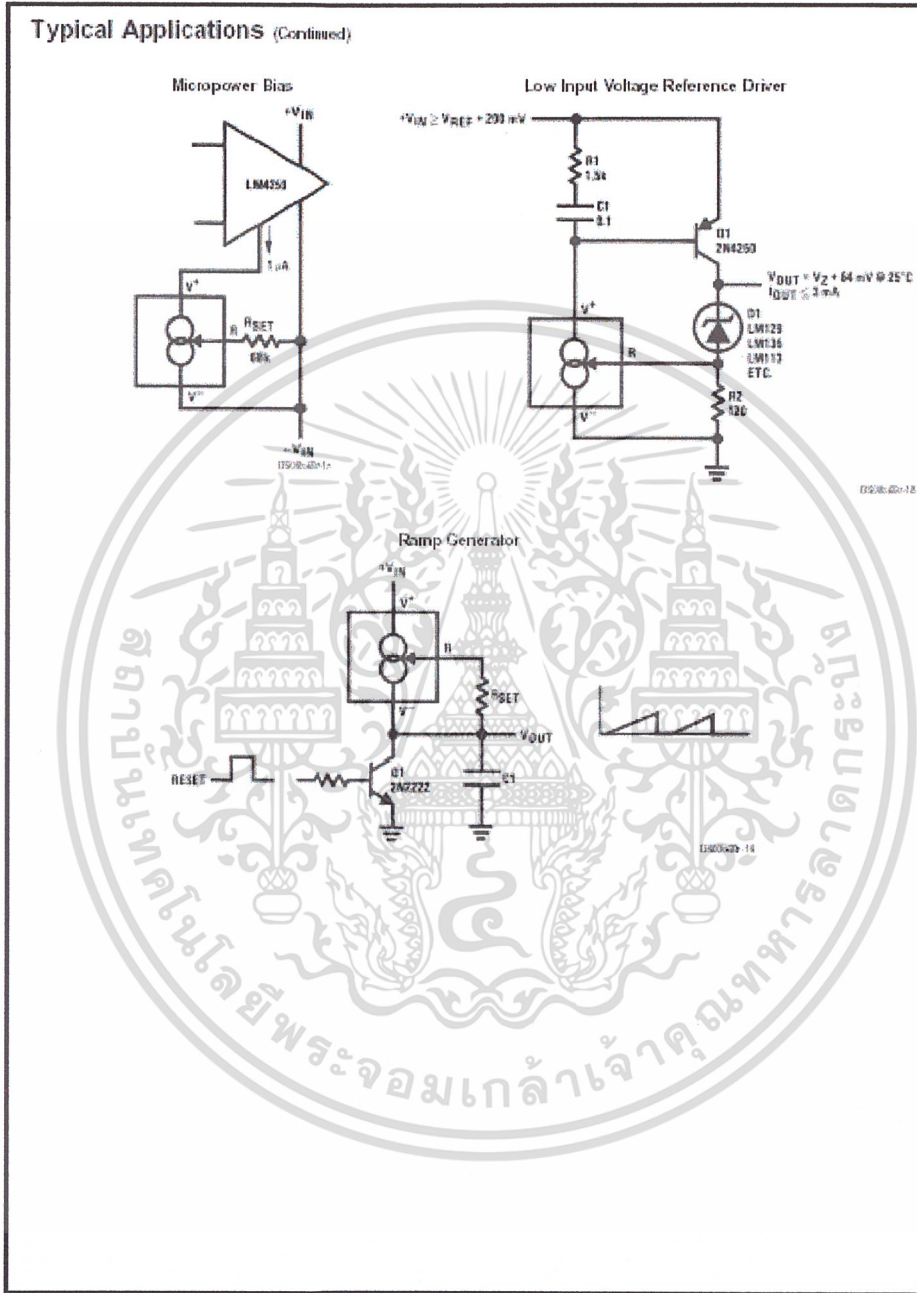


*Select R1 and C1 for optimum stability

Basic 2-Terminal Current Source



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

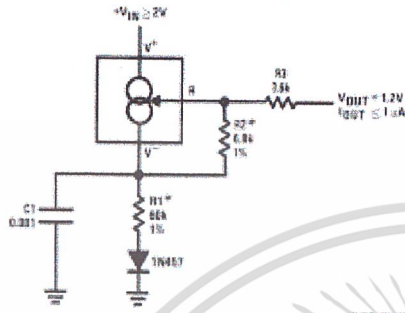


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM134/LM234/LM34

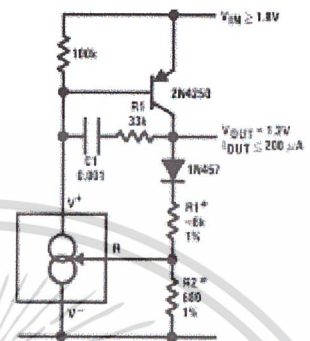
Typical Applications (Continued)

1.2V Reference Operates on 10 μ A and 2V



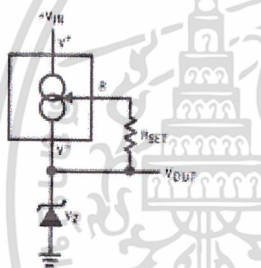
*Select ratio of R1 to R2 to obtain zero temperature drift

1.2V Regulator with 1.8V Minimum Input

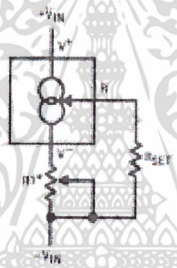


*Select ratio of R1 to R2 for zero temperature drift

Zener Biasing

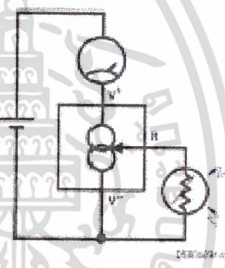


Alternate Trimming Technique

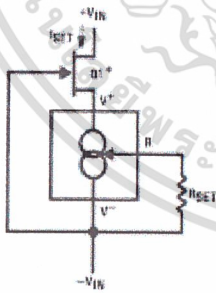


*For $\pm 10\%$ adjustment, select RSET 10% high and make R1 ≈ 0.5 RSET

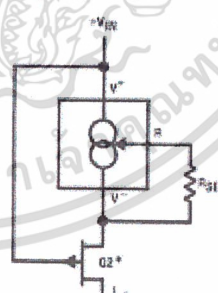
Buffer for Photoconductive Cell



FET Cascoding for Low Capacitance and/or Ultra High Output Impedance



*Select Q1 or Q2 to ensure at least 1V across the LM34. V_p (1 - I_{SET}/I_{SC}) $\geq 1.2V$.



1650040-20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)

Generating Negative Output Impedance

$I_{LIMIT} = -16 \cdot R \cdot I_{SET}$ (If I_{SET} must not exceed I_{SET1})

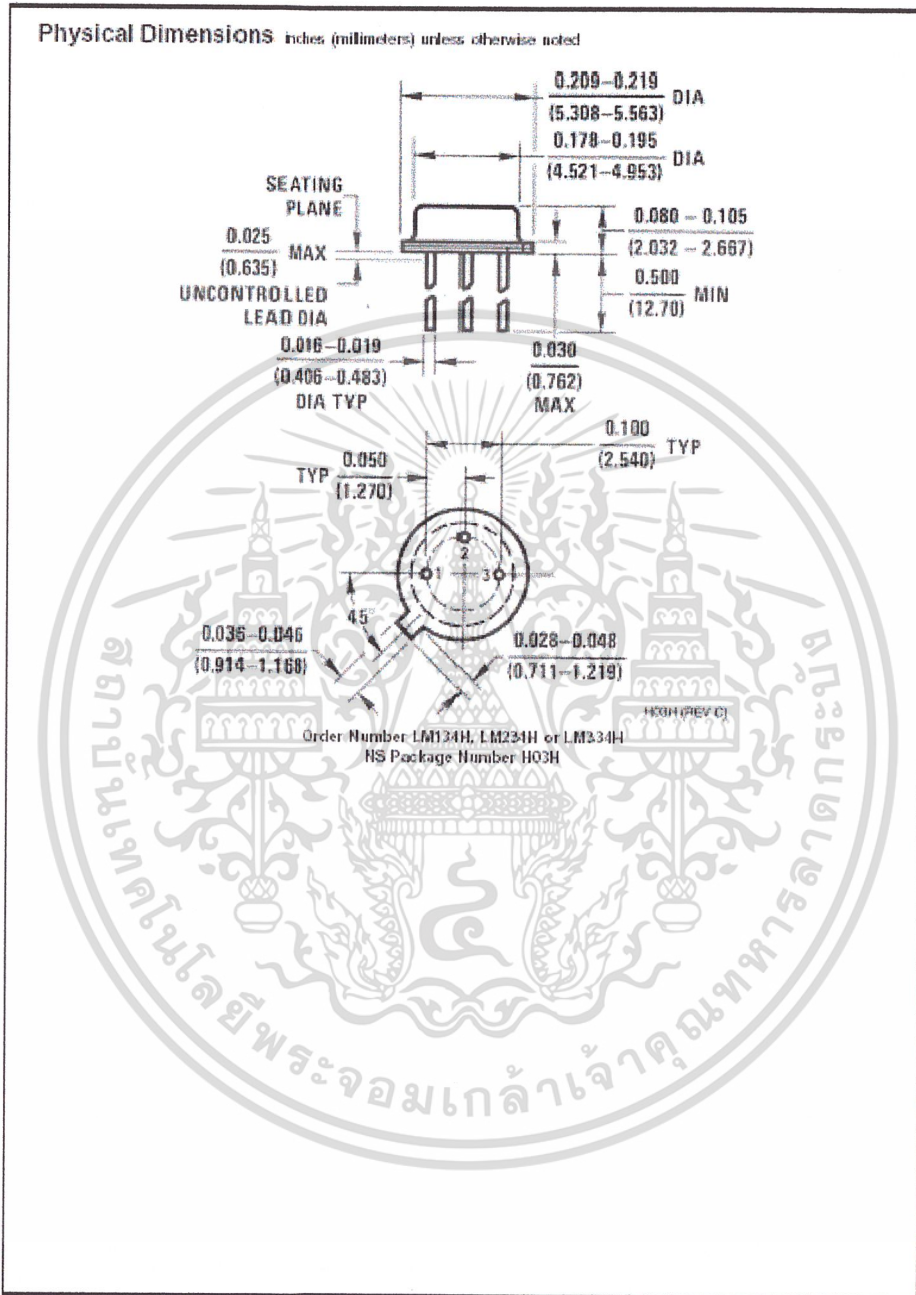
In-Line Current Limiter

Use minimum value required to ensure stability of protected device. This reduces inrush current to a diode short.

Schematic Diagram

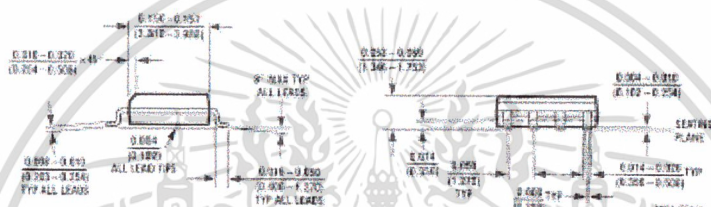
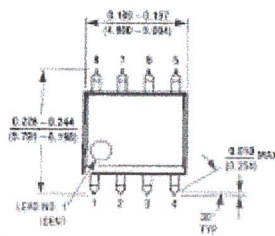
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM134/LM234/LM334

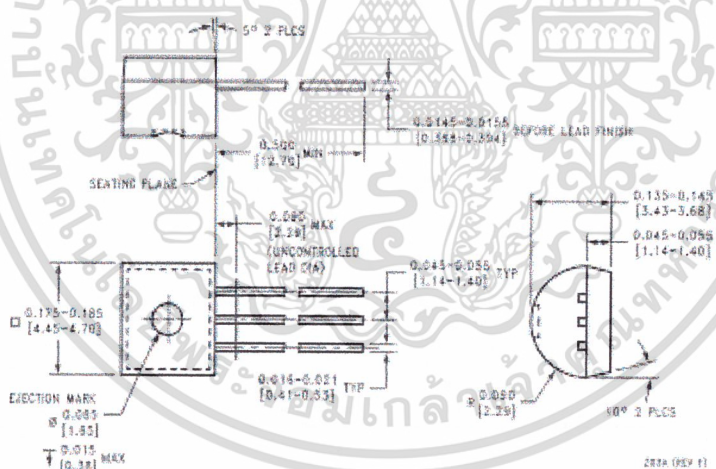


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



SO Package (M)
 Order Number LM334M, LM334MX,
 LM334SM or LM334SMX
 NS Package Number M08A



Order Number LM334Z, LM234Z-3 or LM234Z-6
 NS Package Number Z03A

282A (REV 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ที่สามารถตอบสนองที่ไวต่อสนามแม่เหล็กได้ การปฏิบัติงานการทดลองสามารถลุล่วงไปด้วยดี จากการได้รับคำแนะนำ คำปรึกษา ความรู้ในทางทฤษฎี และวิธีการในการปฏิบัติงาน การแนะนำการใช้เครื่องมือ และการแก้ไขปัญหาต่างๆ โดย ผศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล (อาจารย์ที่ปรึกษา) นายโสภณ พรหมชัย (นักศึกษาปริญญาโท) รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้ให้คำปรึกษาต่างๆ ที่เป็นความรู้เพื่อนำมาใช้ในการปฏิบัติการทดลองครั้งนี้ และคณาจารย์ทุกท่านที่สอนวิชาการที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาใช้ในการทดลองและเป็นความรู้ คณะผู้จัดทำจึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่าน ไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ถาวร หงษ์อินทร์

(นายถาวร หงษ์อินทร์)

นภาพ นิลชาติ

(นายนาวิน นิลชาติ)

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, “อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 478, 2544
2. สมเกียรติ สุขเดช, “สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พิมพ์ครั้งที่ 7 กรุงเทพฯ, 2540
3. Gerold W. Neudeck, “The PN Junction Diode”, Addison-Wesley, Publishing, p.176 ,Company Inc, USA, 1989
4. Jaeger, Richard C. , “Introduction to microelectronic fabrication”, Addison-Wesley Publishing
5. Ljubisa Ristic, Tom Smy and Henry P. Baltes, “A lateral magnetotransistor structure with a linear response to the magnetic field”, IEEE Trans. on Electron Device, Vol.36, pp.1076-1085, 1989
6. Radivoje S. Popovic and Rolf Widmer, “Magnetotransistor in CMOS Technology”, IEEE Trans. on Electron Device, Vol. ED-33, pp.1334-1339, 1986
7. Robert F. Pieret, “Semiconductor Device”, Printed in USA., 1996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้