

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสร้างและพัฒนาตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบขวางโดยเทคโนโลยี CMOS

Fabrication and Development of Magnetic Field Sensor based on Lateral Transistor by CMOS Technology



คณะผู้วิจัย

ผศ.ดร.เดิมนพงษ์ เพ็ชรกุล (หัวหน้าโครงการ)
นายสุรเชษฐ์ วัฒนไพโรจน์

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH
TK

98719

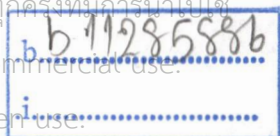
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีงบประมาณประจำ ๒๕๕๔

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

เลขหมู่.....52250

เลขทะเบียน.....

วัน,เดือน,ปี..2.0.ก.พ. 2552



Forbidden to modify the content, and cite the document when use

การสร้างและพัฒนาตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบทรานซิสเตอร์แม่เหล็กแบบขวาง โดยเทคโนโลยี CMOS

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสร้าง และการวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบขวางซึ่งใช้ตรวจสอบสัญญาณ แม่เหล็ก สร้างด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมแบบซีมอส มีความลึกบ่อแยกชนิดพี ซึ่งมีค่าประมาณ 4 ไมโครเมตร เมื่อสร้างเสร็จแล้วทำการทดสอบคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น การทดสอบทรานซิสเตอร์แม่เหล็กแบบขวางโดยใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ ทดสอบผลของกระแสที่เปลี่ยนไปเมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากนั้นก็ทำการวิเคราะห์ผลของความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ได้หลังจากการให้สนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวทรานซิสเตอร์แม่เหล็กแบบขวาง ซึ่งจะอาศัยทฤษฎีการหักเหของกระแสตาม กฎของแรงลอเรนซ์ ทำให้กระแสถูกหักเหทิศทางไปโดยที่ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุดที่ 1.1 T^{-1} ที่เงื่อนไขการให้ไบอัสกระแสเบส 0.8 mA และความยาวเบสที่ $40 \mu\text{m}$ ($L = 40 \mu\text{m}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Fabrication and Development of Magnetic Field Sensor Based on Lateral Transistor by CMOS Technology

Abstract

The purposes of this project is to study, fabricate and analyse properties of lateral magnetotransistor that used for sensing magnetic field. The basic structure of lateral magnetotransistor is fabricated based on CMOS technology with the depth of p-well about 4 micrometer. Then, they are tested the characteristic of P-N junction and DC biasing by using constant current circuit. The effect of current deflection appear when magnetic field is presensed, because lateral magnetotransistor 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 $40 \mu\text{m}$ ($L=40 \mu\text{m}$).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ (Introduction)	1-3
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.2 ขอบเขตของโครงการ	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการนี้	3
บทที่ 2 ทฤษฎีสำหรับการทำงานของทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก	4-25
2.1 การไหลของกระแสในสารกึ่งตัวนำ	4
2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อ พี-เอ็น	5
2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	13
2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)	16
2.5 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก และ การทำงาน	18
2.6 กลไกของทิศทางการหักเหของอิเล็กตรอน	21
2.7 ความไวในการตรวจสอบสัญญาณแม่เหล็ก	24
บทที่ 3 ทฤษฎีของกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	26-34
3.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)	26
3.2 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photo lithography)	29
3.3 กระบวนการแพร่สารเจือ (Diffusion process)	31
3.4 กระบวนการเมทัลไลเซชันด้วย การทำอิวาไปเลชัน	33
บทที่ 4 การออกแบบโครงสร้างเมกนีโตทรานซิสเตอร์	35-43
บทที่ 5 ขั้นตอนการสร้างเมกนีโตทรานซิสเตอร์ด้วยเทคโนโลยี ซีมอส	44-55
บทที่ 6 การวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก	56-83
6.1 วัดความลึก ของ P-well	56
6.2 วัดคุณสมบัติของรอยต่อ P-N ของ เมกนีโตทรานซิสเตอร์	56
6.3 ผลการวัดการไบอัสไฟฟ้ากระแสตรง	62
6.4 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก และ ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก	69
6.4.1 ผลของความไวในการตรวจจับสัญญาณแม่เหล็ก	81
บทที่ 7 สรุป	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บทที่ 7 สรุป ทุกสิ่ง ทุกอย่างที่มีให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ก	85-108
ภาคผนวก ข	109-112
ภาคผนวก ค	113-116
ภาคผนวก ง	117
ภาคผนวก จ	118-129
กิตติกรรมประกาศ	130
บรรณานุกรม	131



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ก) แสดงภาพโครงสร้างตัดขวางของทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก	2
ข) แสดงภาพโครงสร้างด้านบนของทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก	
รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดกระแสครีพท์ ของอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ	4
รูปที่ 2.2 แสดง (ก) การกระจายของสนามไฟฟ้า และความหนาแน่นของพาหะ	
(ข) ทิศทางของกระแสครีพท์ และกระแสการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล	5
รูปที่ 2.3 แสดงรอยต่อพี-เอ็น ในสภาวะสมดุลย์ (Equilibrium $V_A = 0$)	6
รูปที่ 2.4 แสดงรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับ ไบอัสตรง ($V_A > 0$)	7
รูปที่ 2.5 แสดงรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดัน ไบอัสกลับ ($V_A < 0$)	8
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	9
รูปที่ 2.7 แสดงการเกิดพาหะและการรวมตัวของพาหะ โดยระดับพลังงาน Deep level	
ขณะ ไบอัสตรง	10
รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดพาหะและการรวมตัวของพาหะ โดยระดับพลังงาน	
Deep level ขณะ ไบอัสกลับ	11
รูปที่ 2.9 แสดงการเกิดการพังทลายแบบอะวาแลนซ์ (Avalance breakdown)	12
รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดการพังทลายแบบซีเนอร์ (Zener breakdown)	13
รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์ของไบ โพลาร์ทรานซิสเตอร์ เอ็น-พี-เอ็น	
ไบอัสให้ทำงานในฟอร์เวิร์ดแอกทีฟโหมด	14
รูปที่ 2.12 แสดงการให้ไบอัสไบ โพลาร์ทรานซิสเตอร์ในฟอร์เวิร์ดแอกทีฟโหมด	15
รูปที่ 2.13 แสดงทิศทางของกระแสและทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนเมื่อไบอัส	
แบบฟอร์เวิร์ดแอกทีฟโหมด	16
รูปที่ 2.14 แสดงการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ ในสารกึ่งตัวนำหน้าที่ยากรูป	
โฮลพาหะส่วนมาก	17
รูปที่ 2.15 ภาพตัดขวางของทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก n-p-n ที่ใช้ในการทดลอง	18
รูปที่ 2.16 ภาพตัดขวางส่วนของp-well ของทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก	20
รูปที่ 3.1 แสดงอัตราการเกิดของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์	
ไม่ผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงๆ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า	
ไม่ว่าการออกซิเดชันที่ระดับ (100) และ (111) และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี	27
รูปที่ 3.2 ภาพแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ทำกระบวนการ ออกซิเดชันแบบแห้ง	28

รูปที่ 3.3 แสดงอุปกรณ์ระบบไอน้ำ ของการออกซิเดชันแบบขึ้น	28
รูปที่ 3.4 แสดงเตาที่ใช้ในกระบวนการทำออกซิเดชัน	29
รูปที่ 3.5 แสดงกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	30
รูปที่ 3.6 แสดงแผนผังขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	31
รูปที่ 3.7 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการแพร่สารเจือชนิดพี	32
รูปที่ 3.8 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการแพร่สารเจือชนิดเอ็น	33
รูปที่ 3.9 แสดงหลอดสุญญากาศที่ใช้ในกระบวนการเคลือบโลหะในสุญญากาศ	34
รูปที่ 3.10 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการเคลือบโลหะในสุญญากาศ	34
รูปที่ 4.1 แสดง n-p-n ทรานซิสเตอร์แม่เหล็กชนิดตามขวางใน CMOS เทคโนโลยี	35
รูปที่ 4.2 แสดง n-p-n ทรานซิสเตอร์แม่เหล็กชนิดตามขวางแบบมีไซด์เวล ใน CMOS เทคโนโลยี	36
รูปที่ 4.3 แสดง n-p-n ทรานซิสเตอร์แม่เหล็กชนิดตามขวางแบบมีชั้นอิพิทาคี ในไบโพลาร์เทคโนโลยี	37
รูปที่ 4.4 แสดง n-p-n ทรานซิสเตอร์แม่เหล็กชนิดตามขวางแบบ ไม่มีชั้นอิพิทาคีในไบโพลาร์เทคโนโลยี	38
รูปที่ 4.5 แสดง n-p-n ทรานซิสเตอร์แม่เหล็กชนิดตามขวางแบบไซด์เวลเดียวใน CMOS เทคโนโลยี	39
รูปที่ 4.6 แสดง n-p-n ทรานซิสเตอร์แม่เหล็กชนิดตามขวางแบบไซด์เวลเดียว แบบสมมาตรใน CMOS เทคโนโลยี	40
รูปที่ 4.7 แสดง n-p-n ทรานซิสเตอร์แม่เหล็กชนิดตามขวางแบบสมมาตรใน CMOS เทคโนโลยี	41
รูปที่ 4.8 แสดงภาพตัดขวางของทรานซิสเตอร์แม่เหล็กที่ออกแบบเพื่อทดลอง	42
รูปที่ 4.9 แสดงภาพด้านบนของทรานซิสเตอร์แม่เหล็กที่มีความยาว L และกว้าง W	42
รูปที่ 4.10 แสดงแผนภาพการวางตั้งอุปกรณ์ในการสร้างลงบนแผ่นซิลิกอน	43
รูปที่ 4.11 แสดงกล่องใส่กระจกมาส์กหลังกระบวนการออกแบบที่พร้อมใช้งาน	43
รูปที่ 5.1 แสดงแผ่นซิลิกอนที่สร้างออกไซด์แล้ว	45
รูปที่ 5.2 แสดงการถ่ายภาพมาร์กเพื่อสกัดชั้นออกไซด์โดยใช้น้ำยาไวแสงแล้ว	46
รูปที่ 5.3 แสดงแผ่นซิลิกอนหลังจากสกัดชั้นออกไซด์ออกแล้วทำการแพร่โบรอนเข้าไป	47
รูปที่ 5.4 แสดงหลังจากทำการแพร่สารเจือและทำการขัปลึกลับแล้ว	48
รูปที่ 5.5 แสดงโฟโตลิโทกราฟี มาร์กที่ 2 เพื่อสกัดชั้นออกไซด์ออก	48
รูปที่ 5.6 แสดงการสกัดชั้นออกไซด์ออกแล้วเพื่อทำการแพร่สารเจือต่อไป	49

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ 5.7 แสดงการเคลื่อนที่ของสารเจือโดยใช้โบรอนเหลว	49
รูปที่ 5.8 แสดงแผ่นซิลิคอนหลังจากขั้วลิกเกิดเป็น P ⁺	50
รูปที่ 5.9 แสดงเคลื่อนที่ฟิล์ม โดยสกัดชั้นฟิล์มออกตรงบริเวณที่จะสร้างเป็นขั้ว N ⁺	51
รูปที่ 5.10 แสดงการสกัดชั้นออกไซด์ออกแล้ว	51
รูปที่ 5.11 แสดงการเคลื่อนที่ของสารเจือฟอสฟอรัสเหลว	52
รูปที่ 5.12 แสดงหลังทำการขั้วลิกฟอสฟอรัสเหลวที่อุณหภูมิ 1100 °C เกิดเป็นขั้ว N ⁺	52
รูปที่ 5.13 แสดงการเปิดมาร์กคอนเทค โดยเคลื่อนน้ำยาไวแสง	53
รูปที่ 5.14 แสดงการสกัดชั้นออกไซด์ออกแล้วเพื่อทำการเคลื่อนที่ของลูมิเนียมต่อไป	53
รูปที่ 5.15 แสดงการเคลื่อนที่ด้วยลูมิเนียมด้วยวิธีการอิวาโปเลท	54
รูปที่ 5.16 แสดงการสกัดชั้นลูมิเนียมทำเป็นขั้วต่อ	55
รูปที่ 5.17 แสดงรูปชิ้นงาน ทรานซิสเตอร์แม่เหล็กตามขวางที่สร้างขึ้น	55
รูปที่ 6.1 แสดงกราฟผลการวัดระดับความลึกของ P-Well	56
รูปที่ 6.2 แสดงโครงสร้างของทรานซิสเตอร์แม่เหล็กสำหรับวัดรอยต่อ	57
รูปที่ 6.3 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-2	58
รูปที่ 6.4 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-3	58
รูปที่ 6.5 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-4	58
รูปที่ 6.6 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-5	59
รูปที่ 6.7 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 2-3	59
รูปที่ 6.8 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 2-4	59
รูปที่ 6.9 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 2-5	60
รูปที่ 6.10 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 3-4	60
รูปที่ 6.11 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 3-5	60
รูปที่ 6.12 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 4-5	61
รูปที่ 6.13 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 4-5 ที่มีกระแสรั่วมากเกินไป	61
รูปที่ 6.14 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-3 ที่เป็นรอยต่อพีเอ็นแทน	62
รูปที่ 6.15 แสดงวงจรการให้ไบอัสทรานซิสเตอร์แบบฟอร์เวิร์ดแอกทีฟโหมด ควบคุมกระแสด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่	62
รูปที่ 6.16 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์ กับกระแสเบสที่ความกว้างเบส เท่ากับ 10 ไมโครเมตร	63
รูปที่ 6.17 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์ กับกระแสฐานรองที่ความกว้างเบส เท่ากับ 10 ไมโครเมตร	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ 6.18 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์ กับกระแสอิมิตเตอร์ที่ความกว้างเบส เท่ากับ 20 ไมโครเมตร	65
รูปที่ 6.19 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์ กับกระแสฐานรองที่ความกว้างเบส เท่ากับ 20 ไมโครเมตร	66
รูปที่ 6.20 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์ กับกระแสอิมิตเตอร์ที่ความกว้างเบส เท่ากับ 40 ไมโครเมตร	67
รูปที่ 6.21 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์ กับกระแสฐานรองที่ความกว้างเบส เท่ากับ 40 ไมโครเมตร	68
รูปที่ 6.22 แสดงการไบอัสพร้อมทั้งมีสนามแม่เหล็ก B ตัดผ่านระนาบในลักษณะขวาง	69
รูปที่ 6.23 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 10 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	70
รูปที่ 6.24 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 10 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	71
รูปที่ 6.25 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 10 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	72
รูปที่ 6.26 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 10 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	73
รูปที่ 6.27 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 20 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	74
รูปที่ 6.28 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 20 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	75
รูปที่ 6.29 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 20 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	76

รูปที่ 6.30 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 20 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	77
รูปที่ 6.31 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 40 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	78
รูปที่ 6.32 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 40 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	79
รูปที่ 6.33 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 40 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	80
รูปที่ 6.34 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 40 ไมโครเมตรที่กระแสเบส เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา	81
รูปที่ 6.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ต่อ สัญญาณแม่เหล็ก	82
รูปที่ 6.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความไวในการตรวจสอบสัญญาณแม่เหล็ก ภาคผนวก	83
รูปที่ 1 แสดงภาพกล่องป้องกันสัญญาณรบกวน	109
รูปที่ 2 แสดงชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้ว	110
รูปที่ 3 แสดงแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับเพื่อความสะดวกในการต่อภายนอก	110
รูปที่ 4 แผ่นวงจรที่ใช้ต่อขา LMT	111
รูปที่ 5 แสดงภาพกล่องวงจรควบคุมกระแสที่	111
รูปที่ 6 แสดงภาพกล่องต่อวงจร และป้องกันสัญญาณรบกวน	112
รูปที่ 7 แสดงการติดตั้งเพื่อการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก	112
รูปที่ 8 แสดงวงจรสมมูลและสัญลักษณ์ IC ควบคุมกระแส	113
รูปที่ 9 แสดงวงจรทดสอบ IC ควบคุมกระแส	113
รูปที่ 10 แสดงการต่อวงจรควบคุมกระแสเพื่อทดสอบการไบอัสกลับ n-p-n ทรานซิสเตอร์	114
รูปที่ 11 แสดงภาพสัญลักษณ์ต่อวงจร ไบอัสให้กับเมกนีโตทรานซิสเตอร์	115

รูปที่ 12 แสดงภาพการต่อวงจรไบอัสให้กับแมกนีโททรานซิสเตอร์	115
รูปที่ 13 แสดงภาพการติดตั้งกับเครื่องกำเนิดสัญญาณแม่เหล็ก	116
รูปที่ 14 แสดงภาพมิเตอร์ที่แสดงผลการวัด	116



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	85
ตารางที่ 2	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	86
ตารางที่ 3	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	87
ตารางที่ 4	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	88
ตารางที่ 5	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 20 ไมโครเมตร	89
ตารางที่ 6	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 20 ไมโครเมตร	90
ตารางที่ 7	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 20 ไมโครเมตร	91
ตารางที่ 8	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 20 ไมโครเมตร	92
ตารางที่ 9	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 40 ไมโครเมตร	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่ผู้พิมพ์ได้ขออนุญาตและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 10	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 40 ไมโครเมตร	94
ตารางที่ 11	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 40 ไมโครเมตร	95
ตารางที่ 12	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 40 ไมโครเมตร	96
ตารางที่ 13	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 150 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	97
ตารางที่ 14	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 250 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	98
ตารางที่ 15	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 500 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	99
ตารางที่ 16	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 150 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	100
ตารางที่ 17	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 250 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	101
ตารางที่ 18	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 500 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	102
ตารางที่ 19	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 150มิลลิเทสลา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร 103
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 20	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 250มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	104
ตารางที่ 21	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 500 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	105
ตารางที่ 22	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 150 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	106
ตารางที่ 23	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 250 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	107
ตารางที่ 24	ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 500 มิลลิเทสลา ความกว้าง เบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร	108



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

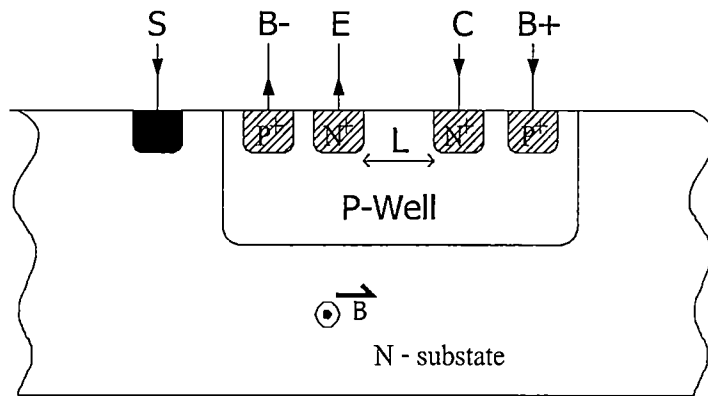
บทนำ

ในการตรวจหาสนามแม่เหล็กนั้นจำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานสัญญาณแม่เหล็กให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เพราะว่าปริมาณทางไฟฟ้าเป็นปริมาณที่สามารถนำมาแสดงผลให้มนุษย์ได้เห็นและเข้าใจได้ง่ายที่สุด เนื่องจากได้มีการคิดประดิษฐ์ อุปกรณ์ที่เปลี่ยนปริมาณทางไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณที่มนุษย์มองเห็นด้วยตาและเข้าใจได้กันมากมายอยู่แล้ว สนามแม่เหล็กเป็นสัญญาณในอีกรูปแบบหนึ่ง การที่เราจะทราบปริมาณของสนามแม่เหล็กแล้วนำมาแสดงผลนั้น จำเป็นที่จะต้องทำให้สัญญาณทางแม่เหล็ก กระทำกับอุปกรณ์บางชนิดแล้วอุปกรณ์ชนิดนั้นสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานแม่เหล็กออกมาเป็นพลังงานในรูปของกระแสหรือแรงดัน เพื่อที่จะทำการตรวจสอบปริมาณและแสดงผลได้ง่าย นอกจากนี้ถ้าอุปกรณ์ที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กนี้สามารถที่จะรวมเข้ากับวงจรรวมได้ในชิปเดียวกันก็จะเป็นการสะดวกอย่างยิ่ง ดังนั้นอุปกรณ์ที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กนั้นควรจะเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและสามารถที่จะสร้างอุปกรณ์นี้ได้ด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมมาตรฐานเช่นเทคโนโลยี CMOS เป็นต้น

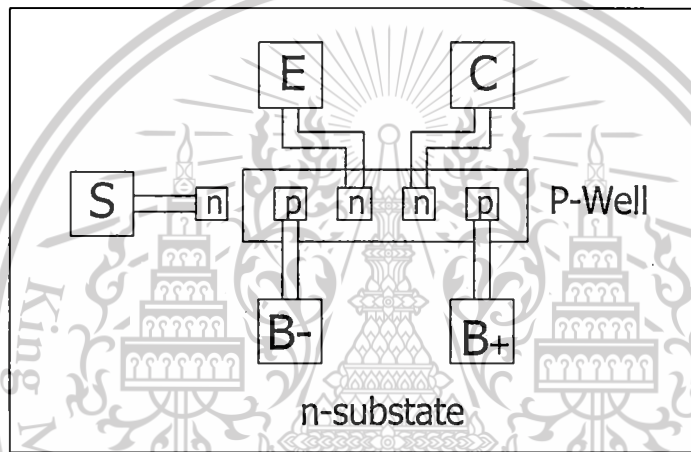
อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เปลี่ยนปริมาณทางแม่เหล็ก (ความเข้ม , ความหนาแน่น) เป็นปริมาณทางไฟฟ้า (แรงดัน , กระแส) มีหลายชนิดด้วยกันเช่น ไดโอดแม่เหล็ก(Magnetic diode) อุปกรณ์ฮอลล์(Hall devices) เป็นต้น แต่อุปกรณ์ฮอลล์ เป็นอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟใช้ปรากฏการณ์ การผลักประจุพาหะ แต่ทรานซิสเตอร์สนามแม่เหล็กจะมีความไวในการตรวจจับที่สูงกว่า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

การแบ่งรูปแบบของทรานซิสเตอร์สนามแม่เหล็ก ได้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ทรานซิสเตอร์สนามแม่เหล็กชนิดกระแสไหลตามแนวขวาง (Lateral magnetotransistor) และทรานซิสเตอร์สนามแม่เหล็กชนิดกระแสไหลตามแนวตั้ง (Vertical magnetotransistor) สำหรับในโครงการวิจัยนี้จะเป็นทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวขวางซึ่งในเทคโนโลยีการสร้างเดียวกันแบบ ซีมอส(CMOS) และทำให้กระแสจากประจุพาหะไหลในชั้นสารกึ่งตัวนำได้ในแนวขวาง ในส่วนของการทดลองได้ทำการสร้างทรานซิสเตอร์สนามแม่เหล็กขึ้นมาตามโครงสร้างที่ได้มีการออกแบบไว้แล้ว เมื่อสร้างเรียบร้อยแล้วก็ได้ทำการวัดคุณสมบัติเบื้องต้น เช่น คุณสมบัติของรอยต่อระหว่างแต่ละรอยต่อ ทั้งยังวัดความลึกของชั้นพีเวลขณะทำการสร้างด้วย จากนั้นก็นำไปตัดแบ่งตัวทรานซิสเตอร์สนามแม่เหล็กออกเป็นชิ้นๆเพื่อต่อสายสำหรับเป็นการนำไปใช้ในการวัดทดลอง ในการวัดทดลองได้มีการออกแบบวงจรด้านคุมกระแสและวัดการไบอัสกระแสตรง แล้วจึงทดสอบกับสนามแม่เหล็กแล้วนำค่าที่ได้มาทำการวิเคราะห์และสรุปผล

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ลิขสิทธิ์ของงานวิจัยฉบับนี้สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเชิงวิชาการและเพื่อการศึกษาเท่านั้น
โดยทรานซิสเตอร์สนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลองนี้มีโครงสร้างภาพตัดขวางและภาพด้านบนดังในรูปที่ 1.1



ก)



ข)

รูปที่ 1.1 ก) แสดงภาพ โครงสร้างตัดขวางของทรานซิสเตอร์สนามแม่เหล็ก
ข) แสดงภาพ โครงสร้างด้านบนของทรานซิสเตอร์สนามแม่เหล็ก

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.1.1 เพื่อพัฒนาการสร้างความตรวจจับสนามแม่เหล็กด้วยเทคโนโลยี CMOS
- 1.1.2 เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก
- 1.1.3 เพื่อศึกษาหลักการการทำงาน และ โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

1.2 ขอบเขตของโครงการ

1.2.1 ออกแบบ โครงสร้างทรานซิสเตอร์สนามแม่เหล็ก ทำการออกแบบโดยจะมีโครงสร้าง ดังรูปที่ 1.1 ซึ่ง ขั้ว เบส และคอลลექเตอร์ ของทรานซิสเตอร์สนามแม่เหล็กจะมีอัตราส่วนของความกว้างต่อความยาวที่แตกต่างกันไปในแต่ละตัวเพื่อทำการทดสอบแต่ละเงื่อนไขที่แตกต่างกัน

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.2.2 ทำการสร้างทรานซิสเตอร์สนามแม่เหล็ก

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

1.2.3 ทำการวัดคุณสมบัติของรอยต่อของทรานซิสเตอร์สนามแม่เหล็ก

เมื่อสร้างทรานซิสเตอร์แล้วจะทำการวัดคุณสมบัติของไฟฟ้าของรอยต่อต่าง ๆ และวัดความลึกของชั้นพีเวล เพื่อทดสอบความผิดพลาดในการสร้างและตรวจสอบว่าทรานซิสเตอร์สนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นมาแล้ว จะสามารถนำไปทดลองต่อไปได้หรือไม่

1.2.4 ทำการทดลองให้ไบอัสสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง

เพื่อหาช่วงการทำงานที่เหมาะสม ด้วยวงจรไบอัสแบบควบคุมกระแสคงที่ โดยกำหนดให้ทรานซิสเตอร์สนามแม่เหล็กทำงานที่ช่วง I_c ประมาณ 0.1 – 1 mA

1.2.5 ทำการทดสอบกับสนามแม่เหล็ก

เมื่อได้จุดการทำงานที่เหมาะสมแล้วก็จะทำการนำไปทดสอบกับสนามแม่เหล็กขนาดประมาณ 5×10^{-2} T - 0.5 T แล้วทำการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส I_c และทำการวิเคราะห์และสรุปผล

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1.3.1 เพื่อเรียนรู้เทคโนโลยีการสร้างตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กในปัจจุบัน

1.3.2 เพื่อพัฒนาและสร้างศักยภาพของเทคโนโลยีภายในประเทศให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.3.3 เพื่อสร้างความรู้ ความชำนาญ ความสามารถ แก่บุคลากรภายในประเทศ เช่น อาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา ในสาขานี้

1.3.4 เพื่อเป็นพื้นฐาน พัฒนาโครงสร้างที่ซับซ้อน และประสิทธิภาพสูงต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

ทฤษฎีสำหรับการทำงานของทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก

การอธิบายเกี่ยวกับการทำงานของทรานซิสเตอร์แม่เหล็กจะมีทฤษฎีที่ใช้อธิบายประกอบไปด้วยทฤษฎีหลักๆดังต่อไปนี้

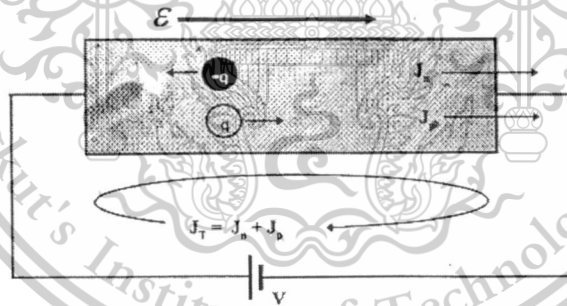
2.1 การไหลของกระแสในสารกึ่งตัวนำ

กระแสที่ไหลในสารกึ่งตัวนำจะมีอยู่ 2 แบบคือ

2.1.1 กระแสดริฟท์(Drift current)

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

จะได้ว่า กระแสดริฟท์ของอิเล็กตรอน $J_n = nq\mu_n \epsilon$



รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดกระแสดริฟท์ ของอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ

2.1.2. กระแสการแพร่(Diffusion current)

เป็นกระแสที่เกิดขึ้นได้เนื่องจากพาหะในสารกึ่งตัวนำมีการเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน โดยจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า การเคลื่อนที่ลักษณะนี้เรียกว่า “กระแสการแพร่”

ในทางปฏิบัติแล้วสารกึ่งตัวนำอาจได้รับสนามไฟฟ้าและมีการกระจายของพาหะไม่สม่ำเสมอได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าในเวลาเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้นจึงมีกระแสดริฟท์และกระแสการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

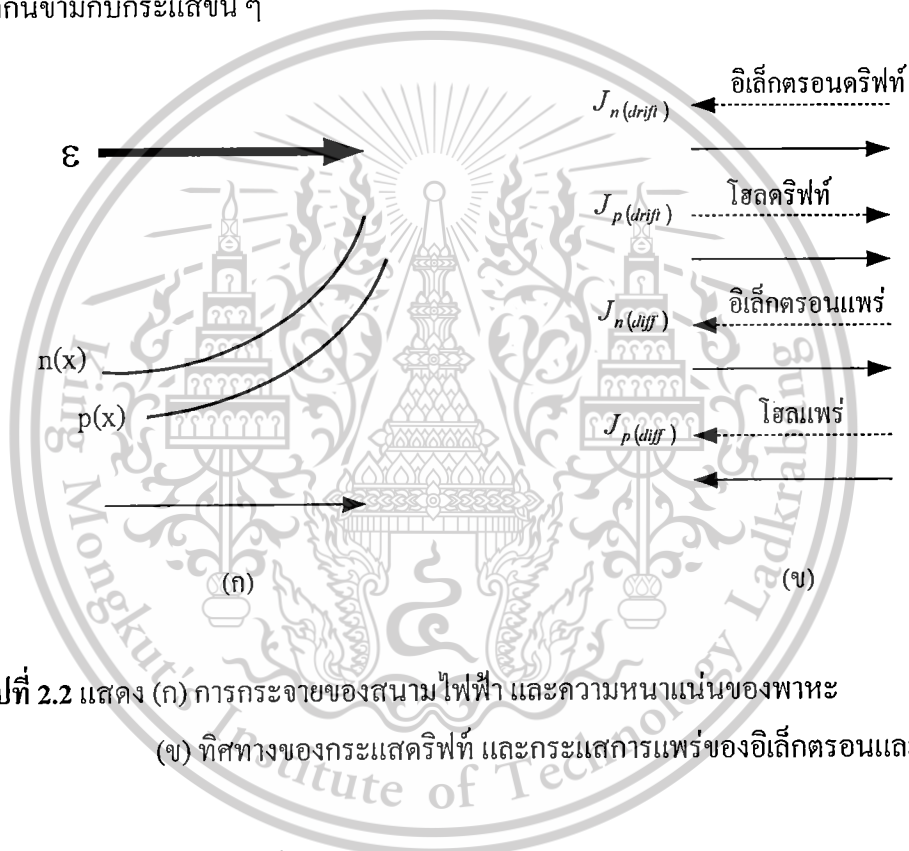
เกิดขึ้นพร้อมๆกันได้ กระแสรวมที่ไหลในสารกึ่งตัวนำจึงเป็นผลรวมของกระแสต่างๆเหล่านี้ดังแสดงในสมการ

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

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

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

จากสมการการเกิดกระแสและทิศทางของกระแสในสารกึ่งตัวนำจะสังเกตได้ว่ากระแสการแพร่ของโฮล มีทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสขึ้น ๆ

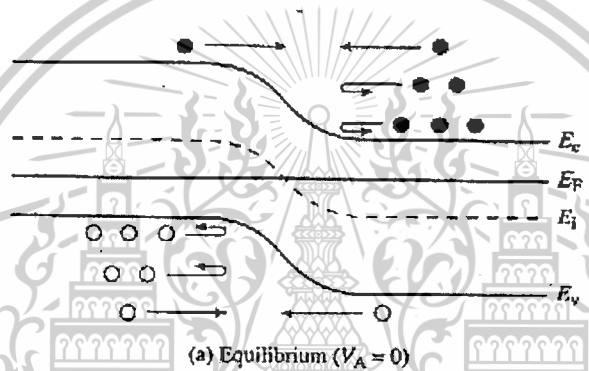


รูปที่ 2.2 แสดง (ก) การกระจายของสนามไฟฟ้า และความหนาแน่นของพาหะ (ข) ทิศทางของกระแสครีฟท์ และกระแสการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล

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) ที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยต่อต้านการเคลื่อน

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



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

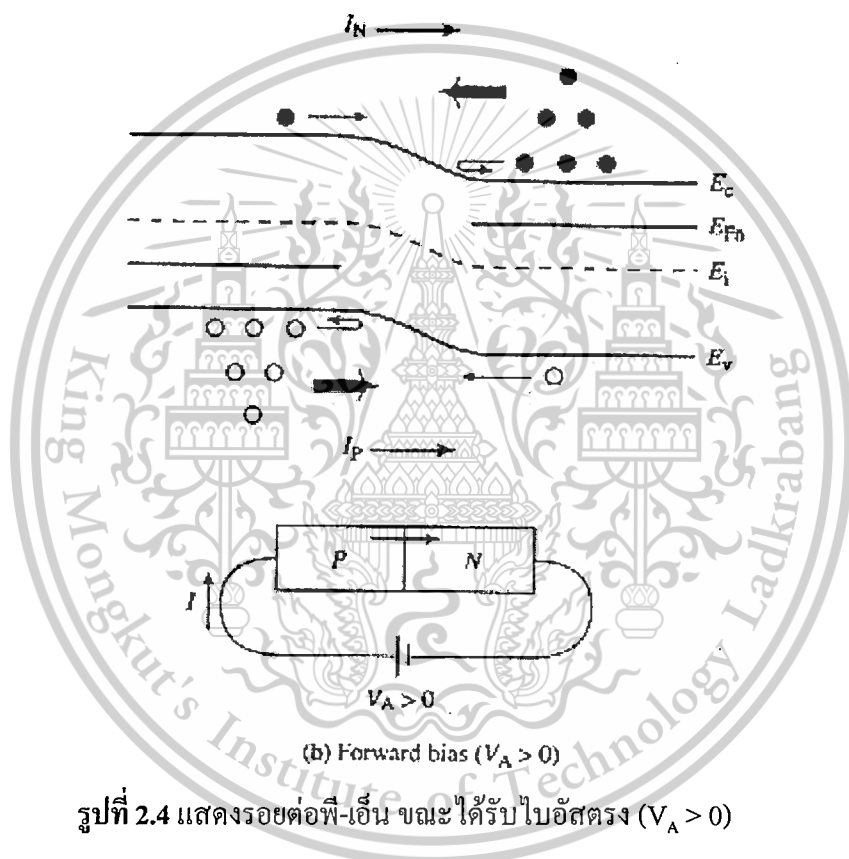
2.2.1 รอยต่อพี-เอ็น ในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง

ในขณะสภาวะสมดุลเมื่อไม่มีแรงดันไบอัสใดๆ ให้แก่รอยต่อ จะไม่มีกระแสไหลผ่านรอยต่อทั้งนี้เนื่องจากมีสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อซึ่งขัดขวางการแพร่ของพาหะ ในกรณีที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง 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 ยอมให้กระแสไหลผ่านได้ดี กระแสดังกล่าวนี้จะถูกต้านก็เฉพาะ ความต้านทานอันเนื่องมาจากเนื้อสารกึ่งตัวนำเท่านั้น ซึ่งมีค่าน้อยมาก และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะในขณะนี้ใช้

จะลดลง และแคบกว่าในกรณีที่ยังไม่ได้รับไบอัส การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และโฮล ทำให้เกิดกระแสไหลขณะได้รับไบอัสตรง ดังสมการ

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

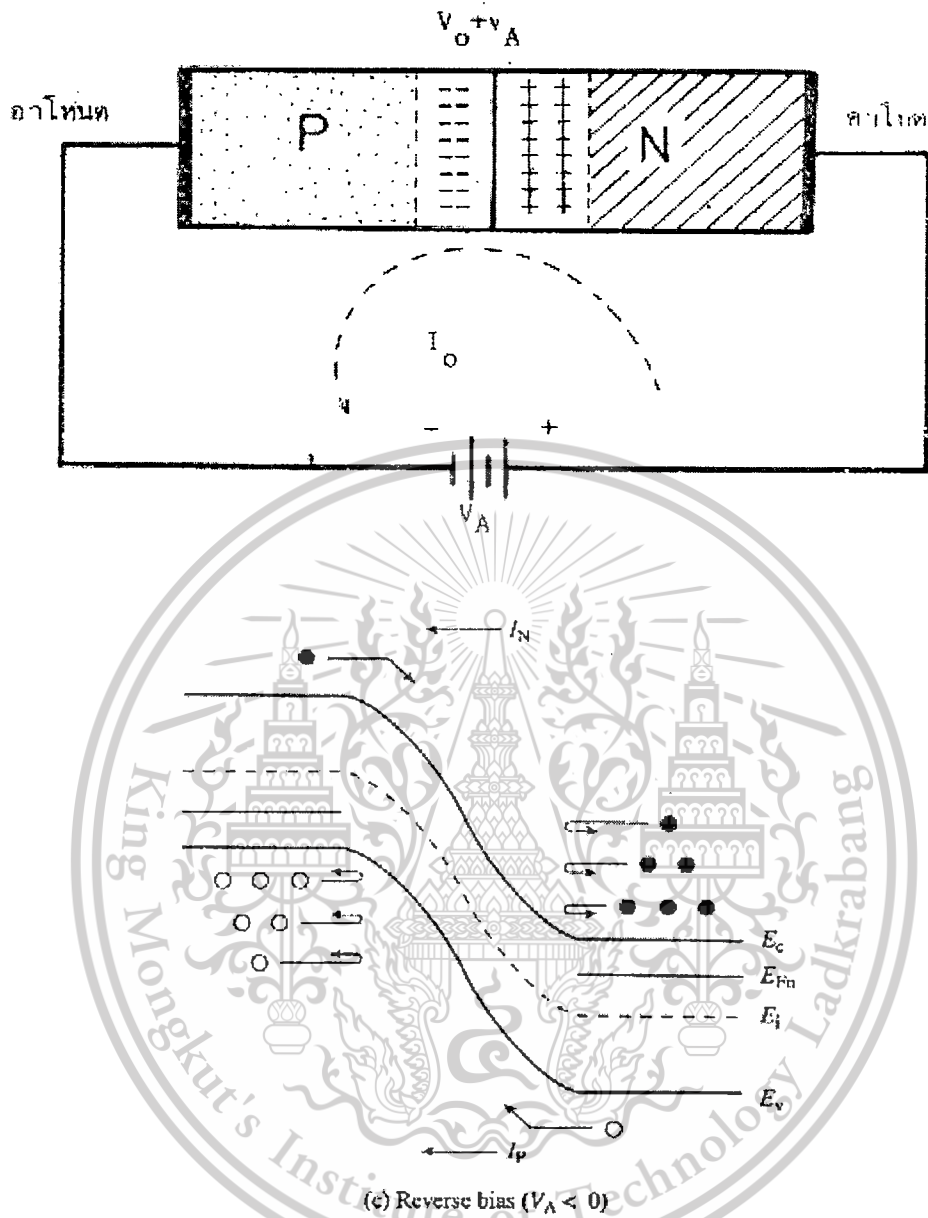


2.2.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับ

ในตอนนี้เราจะมาพิจารณาถึงกรณีที่รอยต่อพี-เอ็น ได้รับไบอัสย้อนกลับดังในรูปที่ 2.5 กล่าวคือทางด้านพีจะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับทางด้านเอ็น ดังนั้นถ้าหากให้แรงดันย้อนกลับแก่รอยต่อมีค่า V_A จะเห็นว่า แรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A จากภายนอกจะไปช่วยเพิ่มแรงดันภายในที่รอยต่อให้มีค่าสูงขึ้นจากเดิมดังนั้นแรงดันตกคร่อมรอยต่อในขณะนี้ก็คือ $(V_0 + V_A)$ นั่นคือศักดาไฟฟ้าภายในรอยต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้พาหะส่วนมากไม่มีโอกาสที่จะแพร่ข้ามรอยต่อได้ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะเอกสารเป็นเอกสารที่สูงจนเวลาสำหรับการเข้านเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ในขณะนี้จะมามีค่าเพิ่มขึ้นและกว้างมากกว่าในกรณีที่ยังไม่ได้รับไบอัส

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



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

กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อจะมีค่าน้อยมากซึ่งจะเป็นกระแสของพาหะส่วนน้อย เรียกว่า “กระแสรั่ว (Leakage current)” ซึ่งความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยใกล้ๆบริเวณปลอดพาหะจะมีจำนวนลดลงสามารถหาได้จากกฎของรอยต่อ คือ

$$P_n |_{I_n} = P_{no} \cdot e^{qV_A / KT} \tag{2.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$n_p |_{I_p} = n_{po} \cdot e^{qV_A / KT} \tag{2.6}$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

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

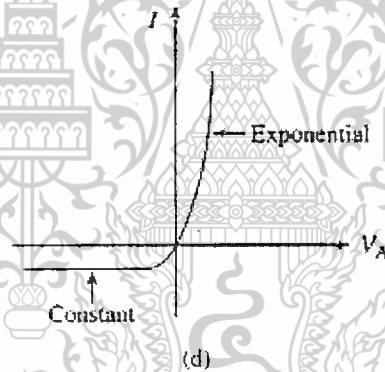
เทอม $\left(e^{qV_A/KT} \right)$ จะน้อยกว่าหนึ่งมากๆจะได้

$$I = -I_0 \quad 2.8$$

จากกระแสที่ได้นั้นจะเห็นได้ว่า กระแส I_0 เป็นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าน้อยมากๆ และไม่ขึ้นอยู่กับการไบอัส แต่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของรอยต่อเท่านั้นเอง

2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

จากสมการกระแสของไดโอดนั้นเมื่อทำการพิจารณาจากการให้ไบอัสทั้งสองแบบแล้วนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสแล้วจะได้กราฟดังนี้



(กราฟ I-V characteristic)

รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.4 กระแสรั่วที่รอยต่อพี-เอ็น

กระแสรั่วที่เกิดขึ้นที่รอยต่อพี-เอ็น จะเกิดขึ้นขณะไบอัสกลับเท่านั้น ซึ่งกระแสรั่ว 2 ชนิดคือ

1. กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ I_0 โดยจะมีค่าประมาณ แสดงดังสมการ

$$I_0 = A.q.n_i^2 \left[\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_N}{L_N N_A} \right] = A.q.n_i^2 \left[\frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} + \frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_N}{\tau_N}} \right] \quad 2.9$$

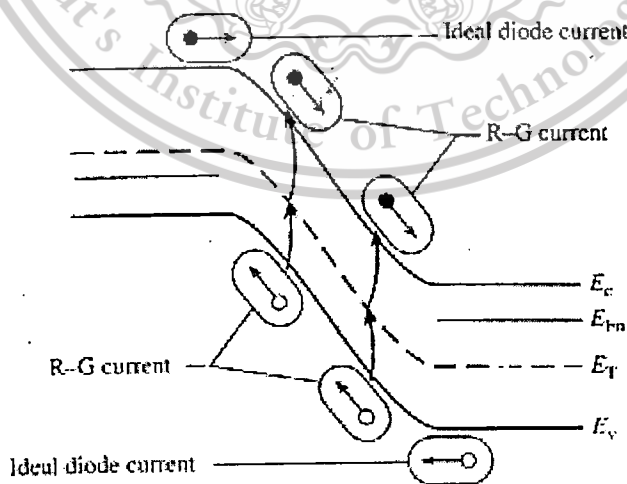
2. กระแสการเกิดและการรวมตัว (Generation-Recombination)

กระแสนี้เรียกกันย่อๆว่ากระแส G-R จะเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของผลึกของชิ้นสาร ซึ่งแบ่งได้เป็น

2.1. ชี้นสารไม่บริสุทธิ์ (Metallic impurities)

2.2. ผลึกสารที่บกพร่อง (Crystalline defects)

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



(a) Reverse bias

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

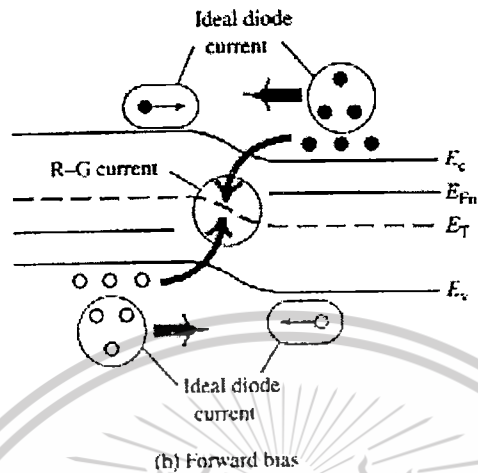
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.7 แสดงการเกิดพาหะและการรวมตัวของพาหะโดย

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ระดับพลังงาน Deep level ขณะ ไบอัสตรง



รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดพาหะและการรวมตัวของพาหะโดยระดับพลังงาน Deep level ขณะ ไบอัสกลับ

2.2.5 ปรากฏการณ์พังทลายที่รอยต่อพี-เอ็น

ถึงแม้ว่าช่วงแรงดันพัง (Breakdown voltage) จะเป็นช่วงที่มีกระแสไหลอย่างมากแต่ก็ไม่ได้หมายความว่าทำให้ไดโอดเสียหายเสมอไป เพราะมีการจำกัดกระแสที่ไหลโดยหลักเลี้ยวอุณหภูมิต่ำๆ แต่ก็หลีกเลี่ยงการเกิดการพังทลายไม่ได้เมื่อป้อน ไบอัสกลับค่าที่สูงค่าๆหนึ่ง โดยจะแบ่งเป็น 2 แบบคือ

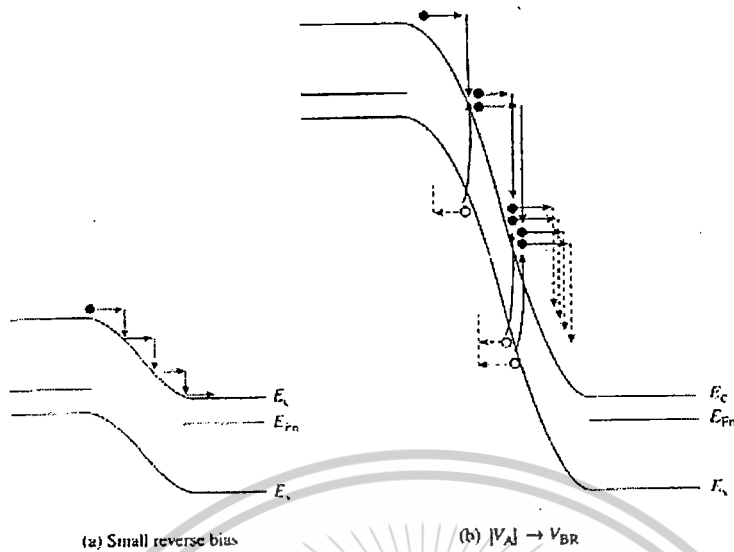
1. การพังทลายแบบอะวอลานซ์ (Avalanche breakdown)

การพังทลายแบบนี้ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไบอัสกลับ (Reverse - Biased ; V_{BR}) โดยกระแสย้อนกลับ (Reverse current) จะเกิดจากพาหะส่วนน้อยที่อยู่บริเวณปลอกพาหะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อพี-เอ็น เองจนกระทั่งทำให้เกิดการชนกันของอิเล็กตรอน กับอะตอมที่อยู่ข้างเคียงไปเรื่อยๆเกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระขึ้นใหม่ทวีคูณอย่างนี้ไปเรื่อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.9 แสดงการเกิดการพังทลายแบบอะวาลานซ์ (Avalance breakdown)

โดยค่ากระแสที่เพิ่มขึ้นด้วยพหุคูณเรียกว่า Multiplication Factor (M) หาได้จากสมการ

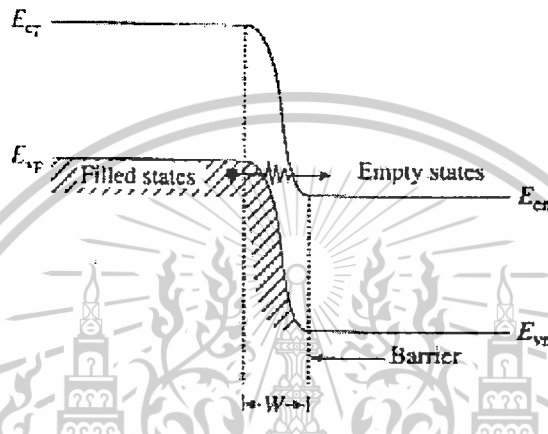
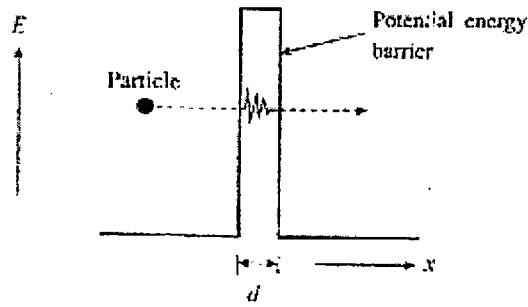
$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^n} \tag{2.10}$$

โดยที่ n มีค่า 3 และ 6 สำหรับสารกึ่งตัวนำเยอรมานีอัมชนิดเอ็นและพี
 N มีค่า 4 และ 2 สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอนชนิดเอ็นและพี
 V_A คือ แรงดันไบอัสย้อนกลับ
 V_B คือ แรงดันย้อนกลับที่จะทำให้เกิดการพังทลายแบบอะวาลันซ์

2. การพังทลายแบบซีเนอร์ (Zener Breakdown)

การพังทลายแบบซีเนอร์เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การทะลนลิ่ง (Tunneling) เพราะเมื่อป้อนแรงดันไบอัสกลับ แล้วจะเกิดปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอน เคลื่อนที่ทะลุผ่านกำแพงศักย์ การพังทลายแบบนี้แม้จะป้อนแรงดันไบอัสกลับ ไม่สูงนักก็จะทำให้เกิดการพังทลายได้เพราะ 2 สาเหตุ คือ บริเวณรอยต่อมีความหนาแน่นของสารเจือที่สูงอยู่แล้ว และเนื่องจากบริเวณปลอดพาหะแคบมากนั่นเอง โดยค่าสนามไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าสูงตามไปด้วยทำให้ยิ่งไปเร่งอิเล็กตรอน ให้อัตราเร็วสูงทะลุผ่านกำแพงศักย์ เกิดเป็นกระแสไหลเป็นจำนวนมากๆได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดการพังทลายแบบซีเนอร์ (Zener breakdown)

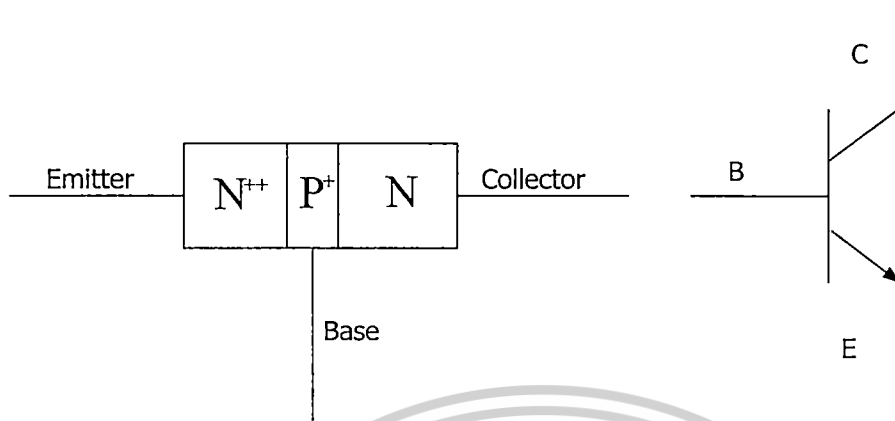
คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่รอยต่อ พี-เอ็น ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติของแมกนีโดทรานซิสเตอร์ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อ พี-เอ็น จนสมการกระแสของรอยต่อ เมื่อมีการให้ทั้งไบอัสตรงและไบอัสกลับ แล้วนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์จะได้กราฟ ดังรูปที่ 2.6

2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

เนื่องจากลักษณะของรอยต่อของทรานซิสเตอร์แม่เหล็กในโครงการนี้ มีลักษณะคล้ายไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์จึงเสนอทฤษฎีของ เอ็น-พี-เอ็น ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ โดยคุณสมบัติของมันคือมีบริเวณการโด๊ปสารเจือแยกกัน เกิดมี 2 รอยต่อที่อยู่ใกล้กัน พอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาภายในระหว่างรอยต่อทั้งสอง ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์มีรอยต่อพีเอ็นมากกว่าหนึ่งรอยต่อ การไบอัสจึงจัดให้รอยต่อหนึ่งได้รับไบอัสตรงและอีกรอยต่อหนึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับที่เหมาะสม การเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยในไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์จะเป็นส่วนสำคัญทางฟิสิกส์ของอุปกรณ์การเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยจะเป็นกระแสกรแพร่ เราจะสามารถทำการวิเคราะห์หาการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยที่ทำให้เกิดกระแสแพร่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และกระแสที่ใหญ่ในแต่ละส่วนของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เรียกว่าแหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาหนังสือดังกล่าวข้างต้นเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้แรงดัน (Voltage controlled current source) แพลคเตอร์ที่ใช้กันคือ $\beta(I_c / I_B)$ เบต้า

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์ของ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เอ็น-พี-เอ็น

จากรูปการทำงานของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์จะมีบริเวณที่ทำการได้ไปแยกจากกัน 3 ส่วน และมีรอยต่อพีเอ็น 2 รอยต่อดังรูปที่ 2.11 ซึ่งแสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์

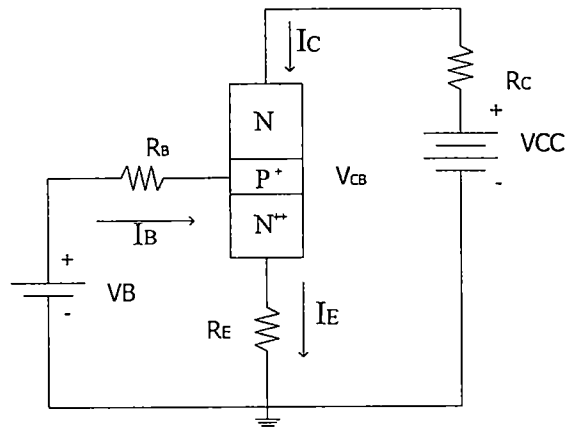
ขั้วทั้ง 3 ที่ค้อยู่มีชื่อเรียกว่าอิมิตเตอร์ (Emitter), เบส (Base) และคอลเลกเตอร์ (Collector) ความกว้างของบริเวณเบสซึ่งเป็นบริเวณที่มีระยะความกว้างน้อย เมื่อเทียบกับระยะการแพร่ของพาหะส่วนน้อยเครื่องหมาย ++ และ + จะบอกถึงค่าความเข้มข้นของการได้ปสารเจือที่ใช้ในไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ บริเวณอิมิตเตอร์จะมีความเข้มข้นสารเจือมากที่สุด ในส่วนคอลเลกเตอร์จะมีความเข้มข้นน้อยที่สุด

โครงสร้างดังในรูปที่ 2.11 เป็นโครงสร้างพื้นฐานของทรานซิสเตอร์ การที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ในลักษณะฟอร์เวิร์ดแอกทีฟโหมด (Forward active mode) จะทำได้โดยให้ไบอัสตรงบริเวณรอยต่อ เบส-อิมิตเตอร์และไบอัส กลับตรงรอยต่อ เบส-คอลเลกเตอร์ ลักษณะการไบอัสเช่นนี้จะทำให้อิเล็กตรอนจากอิมิตเตอร์ถูกฉีดข้ามรอยต่อ เบส-อิมิตเตอร์ เข้าไปในเบสและด้วยระยะความกว้างของเบสที่สั้นกว่าระยะแพร่ของอิเล็กตรอน(Diffusion longer) ทำให้พาหะส่วนน้อยจากอิมิตเตอร์ฉีดข้ามไปยังคอลเลกเตอร์ได้ เนื่องจากรอยต่อ เบส-คอลเลกเตอร์ ได้รับไบอัสย้อนกลับ ดังนั้นความเข้มข้นของพาหะส่วนน้อยที่ขอบของรอยต่อ เบส-คอลเลกเตอร์ จะน้อยเข้าใกล้ศูนย์ ทำให้บริเวณปลอดพาหะแถบ จึงทำให้อิเล็กตรอนแพร่ข้ามเข้าไปได้ง่ายขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.12 แสดงการให้ไบอัสไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ในฟอร์เวิร์ดแอกทีฟโหมด

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

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

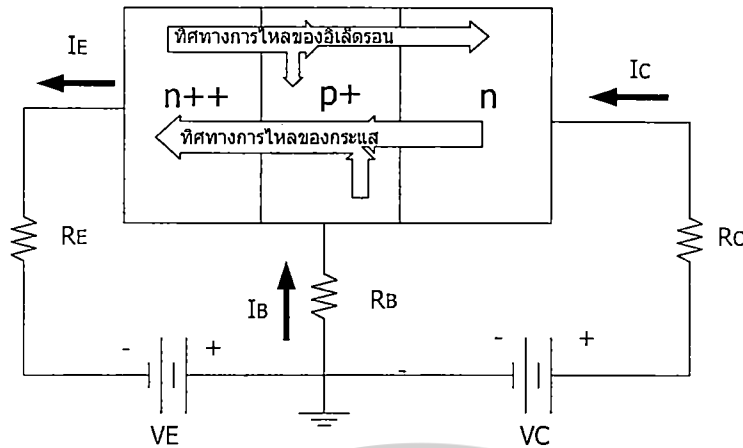
$$V_{CC} - I_C R_C - V_{BE} + V_{EE} = V_R - V_{BC} + V_{BE} \quad 2.11$$

เมื่อเพิ่มแรงดัน เบส-อิมิตเตอร์ไบอัส ตรงกระแสคอลเลคเตอร์ ทำให้ V_R เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งก็หมายถึงแรงดันไบอัสย้อนกลับ เบส-คอลเลคเตอร์ลดลง โดยที่กระแสคอลเลคเตอร์ อาจจะมีค่าพอที่จะทำให้ผลรวมของ V_R และ V_{CC} มีแรงดันตกคร่อมรอยต่อ เบส-คอลเลคเตอร์ การเพิ่มขึ้นของกระแส I_C เพียงเล็กน้อยจากค่านี้จะทำให้ V_R เพิ่มขึ้นเล็กน้อยและรอยต่อ เบส-คอลเลคเตอร์ จะกลับมาเป็นแรงดันไปหน้า เรียกกรณีนี้ว่า อิมิตัว (Saturation) ในการทำงานแบบอิมิตัวตรงรอยต่อ เบส-อิมิตเตอร์ และ เบส-คอลเลคเตอร์ จะถูกไบอัสไปหน้าและกระแสคอลเลคเตอร์จะไม่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน เบส-อิมิตเตอร์อีกต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.13 แสดงทิศทางการไหลของกระแสและทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนเมื่อไบอัสแบบฟอร์เวิร์คแอกทีฟโหมด

จากรูปที่ 2.13 สามารถแสดงสมการการไหลของกระแสและของทรานซิสเตอร์แบบ NPN เขียนเป็นสมการกระแสได้ดังนี้

$$I_E = I_C + I_B \tag{2.12}$$

2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

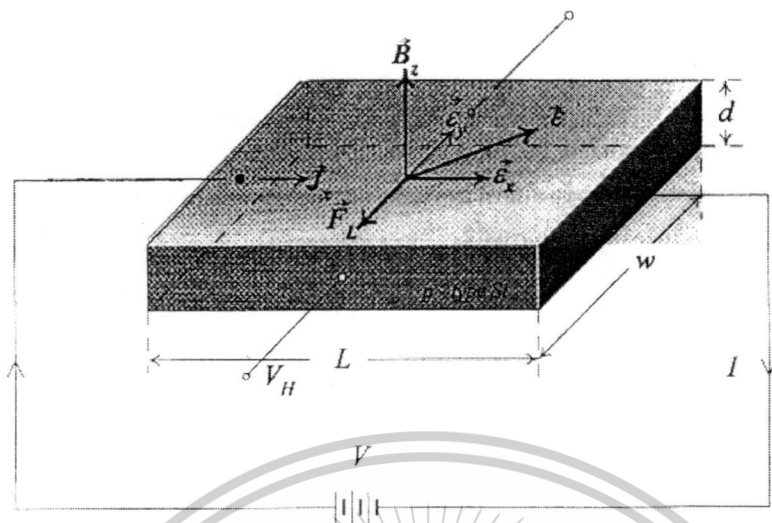
ปรากฏการณ์ฮอลล์ เป็นการวัดค่าความหนาแน่นของพาหะ ชนิดของพาหะและสภาพคล่องของพาหะ คือ ขณะที่มีการไหลของกระแส J_x ไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำในทิศทาง (+X) เมื่อให้สนามแม่เหล็ก B_z ตัดผ่านในทิศทาง Z โดยตั้งฉากกับทิศทางของกระแสจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น โดยมีทิศทาง Y ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของกระแสและทิศทางของสนามแม่เหล็ก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.14 แสดงการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ ในสารกึ่งตัวนำหน้าที่ยากรูป
โพลพาหะส่วนมาก

เมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า E_x จะเกิดมีแรงกระทำต่อประจุ ทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V_x ในทิศทาง $+X$ และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก B_z ตัดผ่านโดยมีทิศทางตั้งฉากกับกระแสจะเกิดมี "แรงลอเรนซ์" (Lorentz force) กระทำต่อประจุโดย

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

ซึ่ง F_L คือแรง ลอเรนซ์ และมีขนาดเป็น

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

ทิศทางของแรงลอเรนซ์ คือ $-y$ ดังนั้นจะทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาทางแกน $-y$ และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ ด้านตรงข้ามจึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้นมา ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน E_y มีทิศ $+y$ สนามไฟฟ้านี้จะต่อต้าน การเคลื่อนที่ของโฮล ซึ่งถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ ในสภาวะสมดุลและ Steady state ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ตรงไปทิศ $+x$ ได้ แสดงว่า แรงลอเรนซ์(F_y) และแรงสนามไฟฟ้าภายใน (qE_y) มีค่าเท่ากัน

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

$$J_x = -nqV_x \quad 2.16$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแต่ง $E_H = \frac{-J_x w + B_z}{nqt}$ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง 2.18 นำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

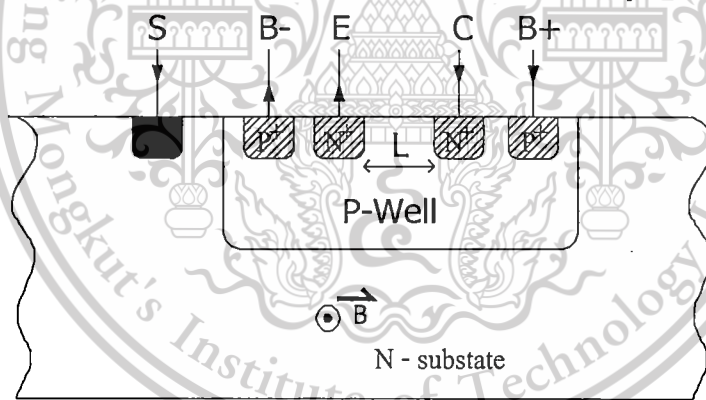
$$H = \frac{-I_x B_z}{nqt} \quad 2.19$$

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

โดย	E	คือ สนามไฟฟ้าในทิศทางตามสัปสกริบ
	I	คือ กระแสไฟฟ้าในทิศทางตามสัปสกริบ
	B	คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในทิศทางตามสัปสกริบ
	H	คือ แรงดันฮอลล์
	R_H	คือ สัมประสิทธิ์ฮอลล์
	n	คือ ความหนาแน่นของประจุพาหะ
	t	คือ ความหนา
	w	คือ ความกว้าง

2.5 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก และ การทำงาน

โครงสร้างของ ทรานซิสเตอร์แม่เหล็กตามขวาง (LMT) ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ภาพตัดขวางของทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก n-p-n ที่ใช้ในการทดลอง

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าตัวอุปกรณ์ถูกสร้างลงบนชั้นพีเวลด ซึ่งโครงสร้างของทรานซิสเตอร์จะมี ลักษณะของเบสที่เป็น 2 ชั้น คือ B+ และ B- จะเร่งทำให้เกิดแรงดันขึ้น ชั้น n⁺ 2 ชั้นใน p-well คือ ชั้น อิมิตเตอร์และขั้วคอลเลคเตอร์ ถูกแยกออกจากกันด้วยความกว้างของระยะขั้วเบส ส่วนขา substrate (S) จะทำหน้าที่คล้าย ๆ กับขาคอลเลคเตอร์อีกขาหนึ่ง ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก ขา S จะไม่มีผลกระทบอะไรหรือน้อยมาก

ไม่ว่าการที่โครงสร้างนี้จะมีรูปร่างคล้าย MOS transistor ส่วนของเบสจะถูกปกคลุมด้วยออกไซด์แต่จะเป็นมอสที่มีขาคาท เหตุผลที่สร้างในลักษณะนี้ คือ เพื่อให้การสร้างทำได้ง่าย ด้วยกระบวนการสร้างซีมอส ทั่ว

ไป ขา E และ C สามารถทำจากขา ซอส และ เครน ของซีมอสทั่วไป และทำให้ง่ายต่อการควบคุมกระแสที่ไหลในเบส ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญของความไวในการทำงาน และเพื่อประสิทธิภาพของตัวอุปกรณ์

พิจารณาการทำงานของตัวอุปกรณ์ สมมติว่าเราไบอัสให้เพียงพอในฟอร์เวิร์ดแอกทีฟโหมด รอยต่อของอิมิตเตอร์เบสได้รับการไบอัสตรงคู่ของรอยต่อ คอลเลคเตอร์เบสได้รับแรงดันไบอัสกลับ ให้ขาของ B+ มีค่าความเป็นบวกมากกว่า B- เพื่อ เร่งสนามไฟฟ้า E_x ในบริเวณเบส (Base region) อิเล็กตรอนจะถูกฉีดในเบสอย่างมาก จากอิมิตเตอร์ไปทางด้านขวาของเวลล์ด้านข้าง (Side well) พวกมันจะถูกผลักไปในทิศทางเดียวกันตามความกว้างของระยะเบสจนถึงคอลเลคเตอร์ (C) ทำให้เกิดกระแส IC อย่างไรก็ดี ตาม กระแสการแพร่ (Diffuse current) และรวมไปถึงกระแสพิคพา (Drift current) บางส่วนจะถูกรวมในสนามไฟฟ้า (E_x) จะแพร่ลงสู่ชั้นฐานรอง (Substrate) และไหลลงสู่ฐานรอง (S) และจะทำให้เกิดกระแส I_s สนามไฟฟ้าที่เร่งภายใน p-well จะช่วยให้ได้สัดส่วนของกระแส I_c และกระแส I_s เมื่อเราให้สนามแม่เหล็ก \bar{B} ที่ตั้งฉากตั้งรูปที่ 2 มันไปทำให้อัตราส่วนของกระแส I_c/I_s เปลี่ยนไป ตามหลักจะทำให้การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นแบบทวีคูณ เหตุที่ทำให้เกิดเหตุการณ์นี้ คือ การหักเหของอิเล็กตรอนที่ไหล เมื่อทิศทางของสนามดังในรูป แรงลอเรนซ์จะหักเหทิศทางของอิเล็กตรอนลงสู่รอยต่อฐานรองและในขณะที่เดียวกันอิเล็กตรอนจะทำให้กระแส I_c ที่ไหล ให้ไบอัสกลับที่รอยต่อ เบส-ฐานรองเกิดการรวมตัวอย่างรวดเร็วที่ผิวคล้าย ๆ กับแมกนีโตไดโอด

เมื่อทิศทางของสนามแม่เหล็ก \bar{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 นี้การคำนวณและวิเคราะห์ถึงความเข้มของกระแส 2 อันด้วยกันคือ กระแสโฮล (J_p) และกระแสอิเล็กตรอน J_n สมการพื้นฐานที่แสดงความหนาแน่นของกระแสในขณะที่มีสนามแม่เหล็กคือ

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

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

\bar{B} คือ สนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

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

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

μ_n คือ ค่าสภาพคล่องของอิเล็กตรอน

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

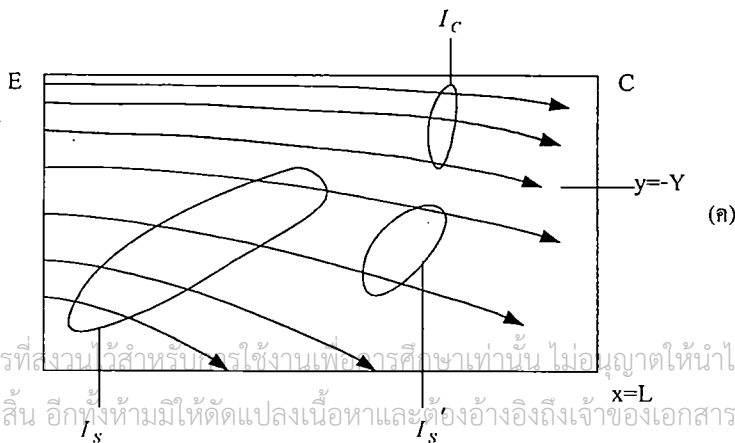
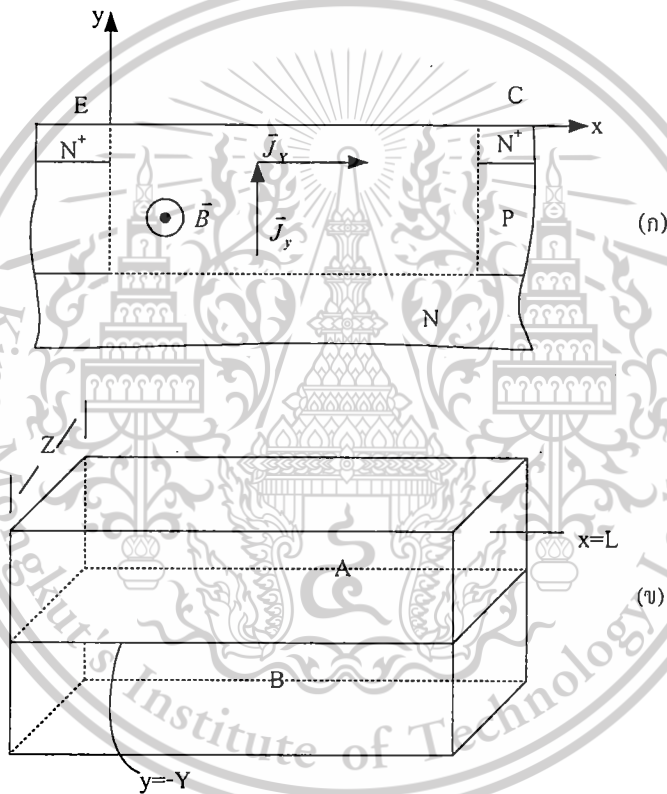
\vec{E} คือ สนามไฟฟ้า

$D_{,,}$ คือ ระยะเวลาแพร่ของประจุ

ในทำนองเดียวกันความเข้มของกระแสไหล สามารถเขียนได้คล้ายกันเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ เพื่อให้สนามแม่เหล็กอ่อน ๆ จะได้

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.16 ภาพตัดขวางส่วนของ p-well ของทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

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

กระแสอิเล็กตรอนที่ไหลในพื้นที่เบสซึ่งสามารถคำนวณได้จากความเร่งของสนามไฟฟ้า E_a จะทำให้ได้สมการสนามไฟฟ้าฮอลล์ออกมา

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

สนามไฟฟ้าที่ไหลในเบสซึ่งสามารถคำนวณความเร่งของสนามไฟฟ้า 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 ของทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก (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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ทางวิชาการเท่านั้น ไม่ควรนำเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เป็นสมการความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ในสนามไฟฟ้า สนามฮอลล์ และ ความเข้มข้นของอิเล็กตรอน สนามไฟฟ้า ภายในจะเกิดขึ้นเพราะความไม่เท่ากันของ ในส่วนของเบส

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

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

$$I_c \cong \int_{-Y}^0 \int_0^L J_{yx}(L) dx dz \quad 2.33$$

เมื่อทำการอินทิเกรทส่วนบนของระนาบ $X = L$ และส่วน I_s' ของกระแสฐานรอง

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

เมื่อทำการอินทิเกรท J_{ny} ส่วนที่ไม่ได้ใช้บนของระนาบ $y = -Y$

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

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

ค่าเฉลี่ยของความเป็นไปได้ P_{xc} จะแสดงในอัตราส่วนของกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสที่ไหลข้ามระนาบ x คือ ค่าคงที่ในส่วน A แสดงดังสมการ

$$P_{xc}(x) \cong \frac{I_c(0)}{\int_{-y}^z \int_0^z J_{nox} dy dz} \quad 2.38$$

$I_c(0)$ 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

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

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

เราสามารถแบ่งขอบเขตการทำงานของทรานซิสเตอร์แม่เหล็กตามขวางได้ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้วงนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $S^D \cong (\mu_p - \mu_n) \frac{L}{Y}$ 2.45
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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) แมกนีโตเซชัน(M) และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก(B) โดยทั้งหมดนี้เป็นปริมาณทางเวกเตอร์ซึ่งจะมีทิศทางที่สัมพันธ์กันดังสมการ

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

เมื่อ μ_0 คือ permeability ของสุญญากาศ และในวัสดุที่ไม่ใช่แม่เหล็ก เช่น ซิลิกอน แมกนีโตเซชันจะเป็น $M=0$ 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 ส่วนเทอมทางด้านขวาแสดงถึงแรงคูลอมป์(qE) และเทอมที่ 2 แสดงถึงแรงลอเรนซ์($qv \times B$) แรงลอเรนซ์จะขึ้นอยู่กับ B และ v ซึ่งเป็นปริมาณเวกเตอร์ และสาเหตุของการหักเหทิศทางของพาหะของสนามไฟฟ้าโดยมุมฮอลล์ θ_H โดยอธิบายดังสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

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

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดแต่สิ่งเหล่านี้และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 จากโครงสร้างคั้งตัวอย่างของเมกนีโตทรานซิสเตอร์ ตัวอุปกรณ์จะอยู่ใน P-well จะทำหน้าที่รองรับส่วนที่เป็นเบส B_1 และ B_2 ใช้สำหรับการไบอัสให้อุปกรณ์เกิดสนามไฟฟ้าไหลตามขวาง ส่วนที่เป็น n^+ 2 ส่วนจะใช้เป็นส่วนอิมิตเตอร์ และคอลเลคเตอร์ โดยจะแยกจากกันโดยระยะความยาวเบส L ส่วนรอยต่อพีเวลด กับฐานรองชนิดเอ็น จะถูกให้ไบอัสกลับเพื่อเกิดเป็นส่วนแยกอุปกรณ์ออกจากกันและประพุดิตัวเป็น คอลเลคเตอร์แผ่นนั่นเอง ซึ่งทรานซิสเตอร์จะทำงานได้โดย รอยต่ออิมิตเตอร์-เบส ให้ไบอัสตรง ส่วนรอยต่อคอลเลคเตอร์-เบส ให้ไบอัส กลับ เป็นผลทำให้อิเล็กตรอนจะถูกฉีดเข้าไปที่ขาคอลเลคเตอร์หรือคอลเลคเตอร์แผ่น ถ้าเราให้ศักย์ไฟฟ้าของ B^+ มากกว่า B^- ก็จะทำให้เกิดกระแสครีฟลักอิเล็กตรอนไปยังขาคอลเลคเตอร์เพิ่มมากขึ้นเรียกกระแสนี้ว่า I_{C0} และขณะที่บ่อนสนามแม่เหล็กตามขวางกับตัวอุปกรณ์ทำให้แรงลอเรนซ์ผลักอิเล็กตรอนไปที่ขาคอลเลคเตอร์เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิมอีก 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 กระแสคอลเลคเตอร์เมื่อยัง ไม่มีสนามแม่เหล็ก

I_C คือ กระแสคอลเลคเตอร์เมื่อมีสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

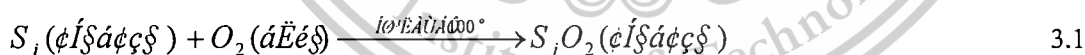
บทที่ 3

ทฤษฎีของกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

กระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในปัจจุบันสามารถพัฒนาไปอย่างรวดเร็วทั้งนี้เพื่อที่จะได้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น โดยส่วนใหญ่แล้วพยายามที่จะสร้างลงบนชิปให้ได้ตัวอุปกรณ์ให้ได้มากๆ เป็นการประหยัดต้นทุนด้วย อาจจะเป็นวงจรรวม (IC) ซึ่งนั่นก็คือ ต้องมีห้องปฏิบัติการที่มีความสะอาดสูง เทคโนโลยีที่มีความเที่ยงตรงสูงตามไปด้วย แต่หากว่าในปริญญานิพนธ์นี้จะเป็นวิธีการสร้างง่ายๆ ซึ่งเป็นพื้นฐานในการสร้างโดยทั่วไปซึ่งเป็นกระบวนการสร้างที่ใช้ในการสร้างทรานซิสเตอร์แม่เหล็กซึ่งกระบวนการสร้างที่สำคัญๆมีดังต่อไปนี้

3.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)

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

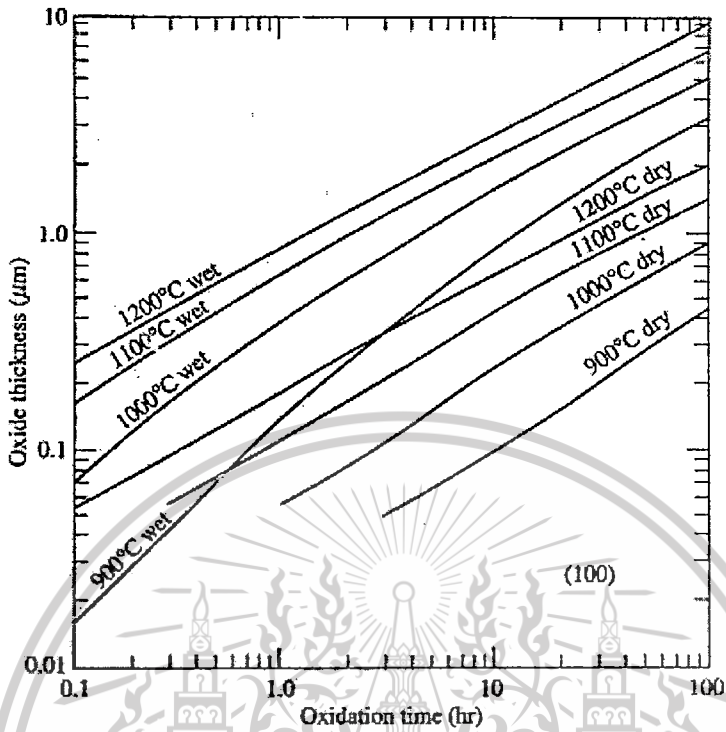


ขั้นตอนการทำออกซิเดชัน (Oxidation process) คือ เตรียมแผ่นซิลิกอน โดยต้องทำความสะอาดแผ่นให้สะอาดเสียก่อน จากนั้นวางลงบนโบริด (Boat) แล้วใส่เข้าไปในท่อควอตซ์โดยใช้ท่อกลมเรียบที่ทำด้วยควอตซ์ใช้ในการดันโบริดอย่างช้า ๆ เพื่อไม่ให้แผ่นซิลิกอนแตกเพราะจะเจอกับอุณหภูมิที่สูงเกินไป จากนั้นค่อยดันโบริดจนถึงตรงกลางของเตาในการทำออกซิเดชันความหนาของชั้นออกไซด์ จะขึ้นอยู่กับเวลาและแบบในการทำออกซิเดชันด้วยชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ดังกล่าวจะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดีและสามารถควบคุมความหนาได้ตามกราฟรูปที่ 3.1 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

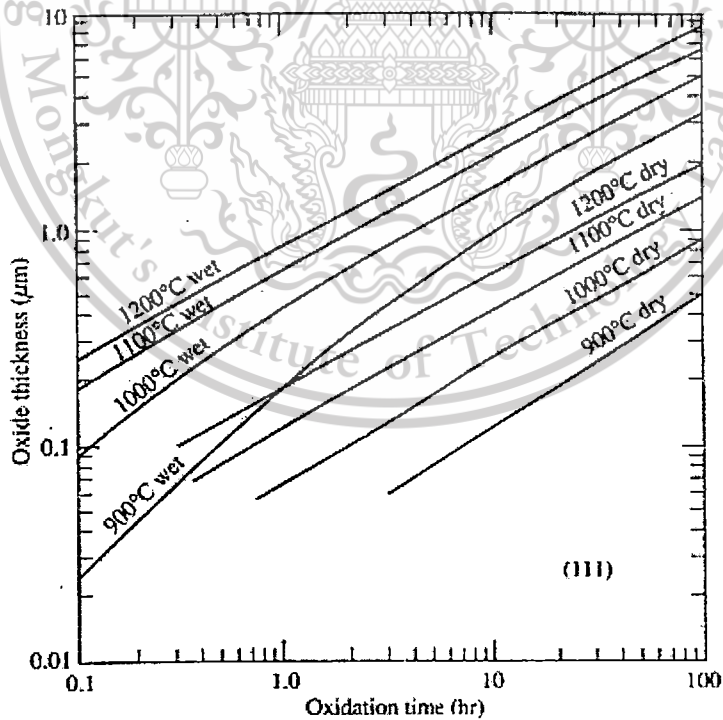
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(a)



(b)

รูปที่ 3.1 แสดงอัตราการเกิดของชั้นฟิล์มออกไซด์ของการออกซิเดชันระนาบ (100) และ (111) ของสารที่เป็นเอกสักรูปทรงสามเหลี่ยมที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าคงที่การเติบโตของฟิล์มออกไซด์กับการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

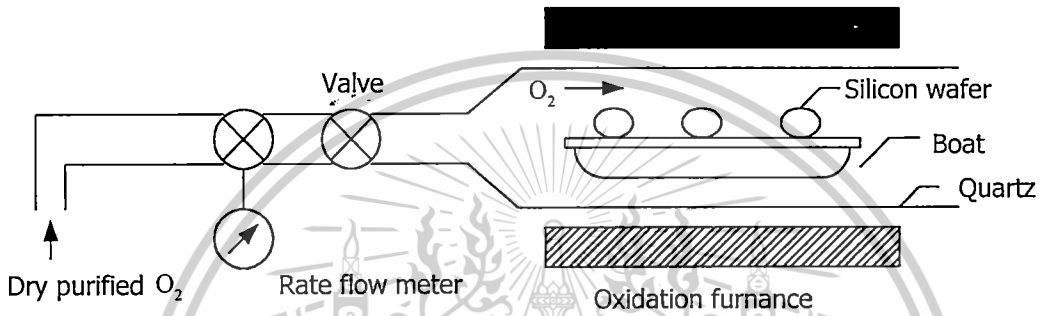
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เราสามารถควบคุมความหนาของชั้นออกไซด์ บนผิวซิลิกอนได้โดยให้ความร้อนกับออกซิเจนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 900 – 1200 °c การออกซิเดชันสามารถทำได้ 2 แบบ คือ

3.1.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation)

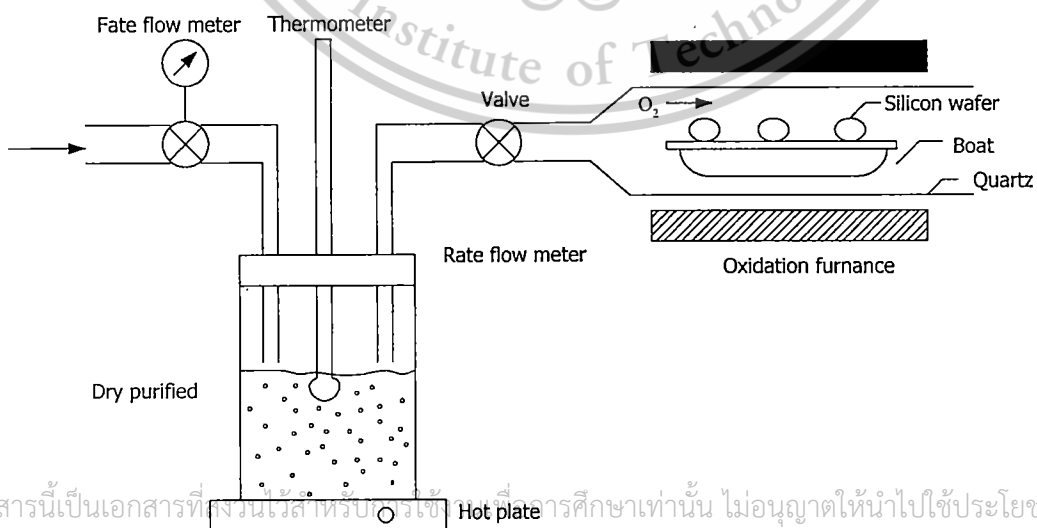
เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 1200 °c ตามสมการที่ (3.1) จะทำให้อะตอมของซิลิกอนรวมตัวกับออกซิเจนจนเกิดเป็นซิลิกอน ไดออกไซด์ และมีอุปกรณ์ที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ทำกระบวนการ ออกซิเดชันแบบแห้ง

3.1.2 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิกอนกับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำปฏิกิริยานี้แสดงในสมการที่ 3.2 นั่นเอง ทำได้โดยการปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าไปในขวดแก้ว ซึ่งบรรจุน้ำบริสุทธิ์ไว้ในขวดแก้วที่ถูกให้ความร้อนประมาณ 90 °c ที่ก๊าซออกซิเจนจะต่อไว้ในขวดแก้วแล้วเมื่อเกิดเป็นไอน้ำ แล้วจะเป็นไอน้ำที่ถูกป้อนเข้าไปในเตาพร้อมกับออกซิเจนบริสุทธิ์ ดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงอุปกรณ์ระบบ ไอน้ำ ของการออกซิเดชันแบบชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กระบวนการออกซิเดชันแบบชั้นนี้จะทำให้เกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ได้เร็วกว่าแบบแห้ง เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเล็กกว่าโมเลกุลของออกซิเจนจึงทำให้ห่อหุ้มของซิลิกอนเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่า แต่จะมีข้อเสีย คือ มีคุณสมบัติการเป็นฉนวนที่ต่ำกว่าแบบแห้ง เพราะมันจะมีรูพรุนเกิดขึ้น กราฟแสดงความหนาของการออกซิเดชันแบบชั้น สามารถดูได้จากรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.4 แสดงเตาที่ใช้ในกระบวนการทำออกซิเดชัน

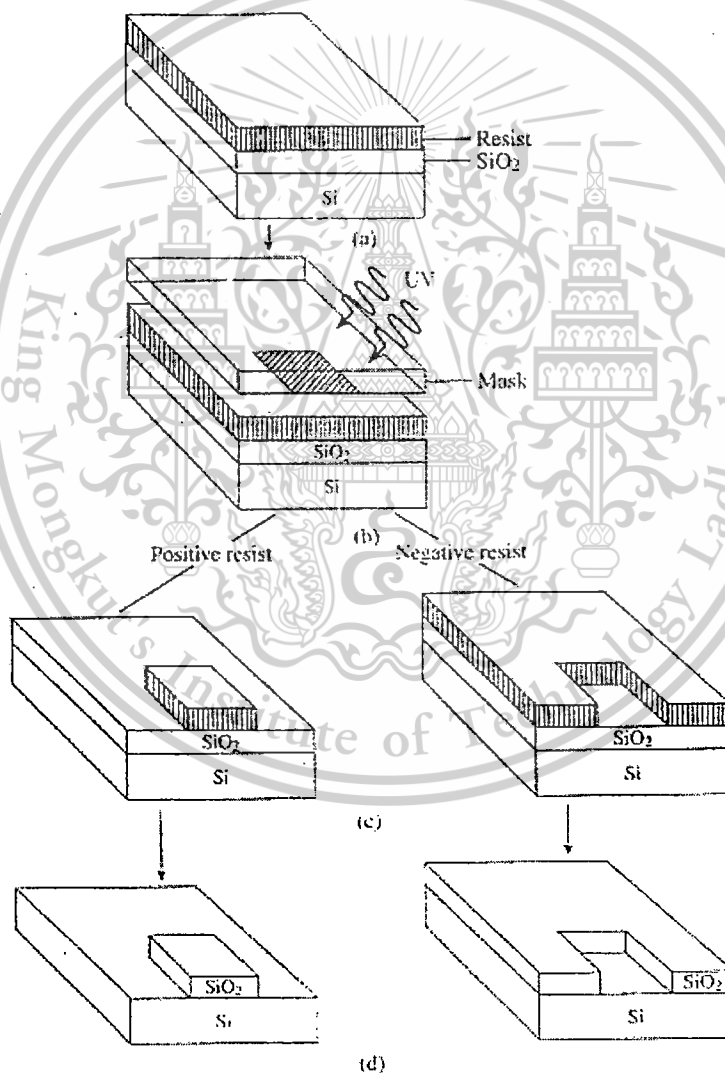
3.2 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photo lithography)

เป็นวิธีการนำลวดลายบนมาร์คที่ต้องการไปอยู่บนแผ่นซิลิกอน โดยการพิมพ์ภาพด้วยแม่พิมพ์เรียบที่ทำขึ้นเพื่อการสกัดชั้นสารของซิลิกอนไดออกไซด์ ในบางส่วนหรือในบริเวณที่ต้องการโดยอาศัยเทคนิคทางแสง (Optical technique) ซึ่งคล้ายกับเทคนิคในการถ่ายภาพ ด้วยการใส่สารเคมีทำปฏิกิริยา จะมีผลทำให้เกิดภาพซึ่งคล้ายกับเทคนิคในการถ่ายภาพ ด้วยการใส่สารเคมีทำปฏิกิริยา จะมีผลทำให้เกิดภาพหรือลวดลายขึ้น กระบวนการคือ เริ่มต้นจากการนำแผ่นผลึกซิลิกอน ซึ่งมีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์อยู่บนผิวด้านบนนำไปเคลือบผิวหน้าด้วยน้ำยาไวแสงจากนั้นนำไปฉายแสงโดยผ่านกระจกสลัดลายต้นแบบที่เรียกว่าโฟโตมาร์ค (Photo mark) ซึ่งทำหน้าที่เป็นต้นแบบที่มีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจก ซึ่งได้มาจากการออกแบบ แสงที่ฉายผ่านกระจกมาร์คจะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลายแสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสงจึงมีบริเวณที่ถูกแสงและไม่ถูกแสง ไม่ว่ากลไกใดก็ตาม สิ่งนี้ทำให้ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ถูกแสงและแตกต่างกันตามบริเวณที่ถูกแสงจะทำให้ปฏิกิริยาเคมีของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนไปแล้วแต่คุณสมบัติและแตกต่างกันตาม

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่นซิลิกอนไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสง ถูกละลายออกไปบางส่วนจะคงเหลือค้างอยู่ ปกคลุมอยู่บนผิวของซิลิกอนไดออกไซด์ และจะทำหน้าที่ ป้องกันไม่ให้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์บริเวณนี้ถูกสลัดออกไปเมื่อถูกกัดหรือเอตซิงค์ (Etching) ด้วย “สารตัวกัด” หรือเอ็ตแอนด์ เช่นกรดกัดแก้ว (HF) เป็นต้น ซึ่งในขั้นตอนของการเอตซิงค์ แผ่นผลึกจะ ถูกนำไปทำปฏิกิริยาเคมีกับสารเคมีที่เป็นสารตัวกัดหรือเอ็ตแซนท์ ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะสามารถ สกัดหรือละลายชั้นออกไซด์ออกไป หลังจากนั้นก็ทำการลอกน้ำยาไวแสงออก ก็จะได้ภาพเหมือนกระจก มาร็อค ลำดับขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยทั่วไปแสดงได้ดังในรูปที่ 3.5

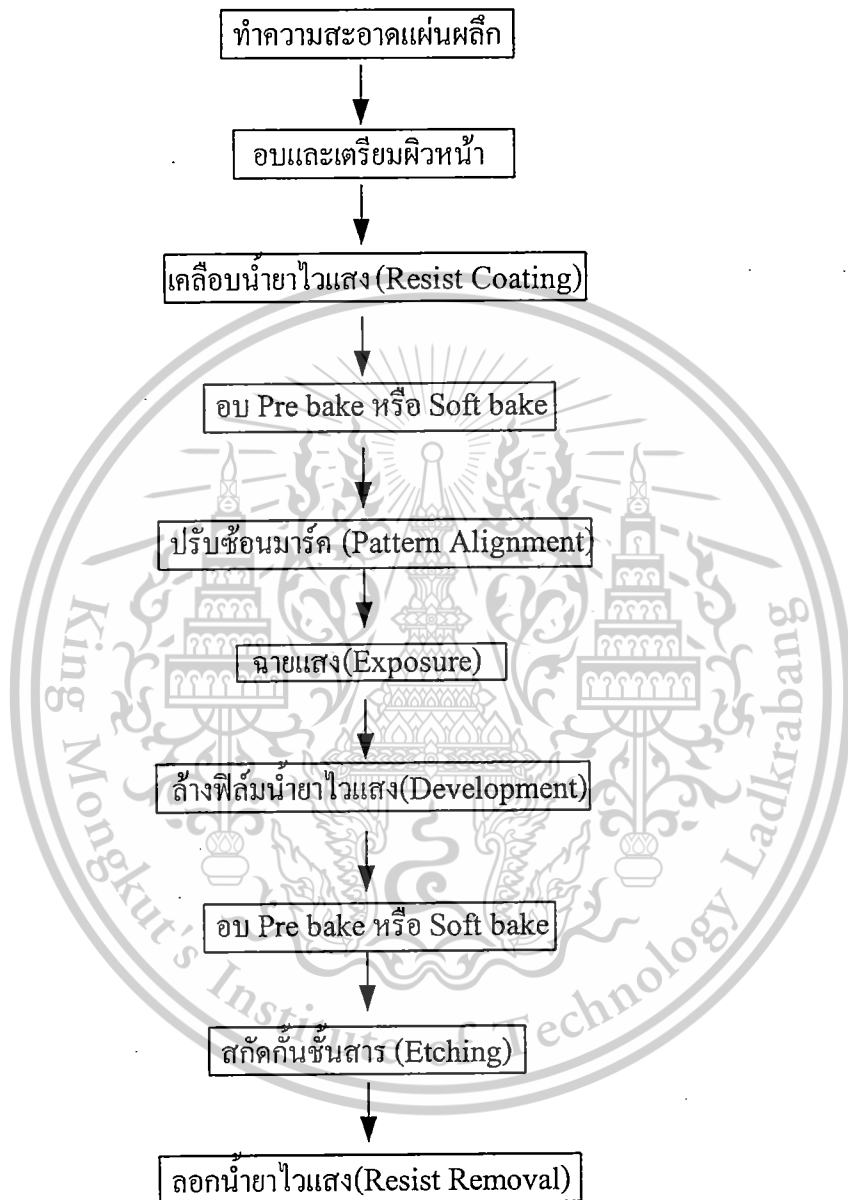


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.5 แสดงกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ภายใต้งานนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ลำดับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี สามารถแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงแผนผังขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

3.3 กระบวนการแพร่สารเจือ (Diffusion process)

เอกสารนี้ การแพร่สารเจือเป็นกระบวนการเติมสิ่งแปลกปลอมให้กับสารกึ่งตัวนำเพื่อให้สารกึ่งตัวนำนั้นมีค่าคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นหรือชนิดที่ขึ้นอยู่กับอะตอมของสิ่งแปลกปลอมกระบวนการนี้ทำได้โดยใช้ เจือด้วยกระบวนการแพร่ reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

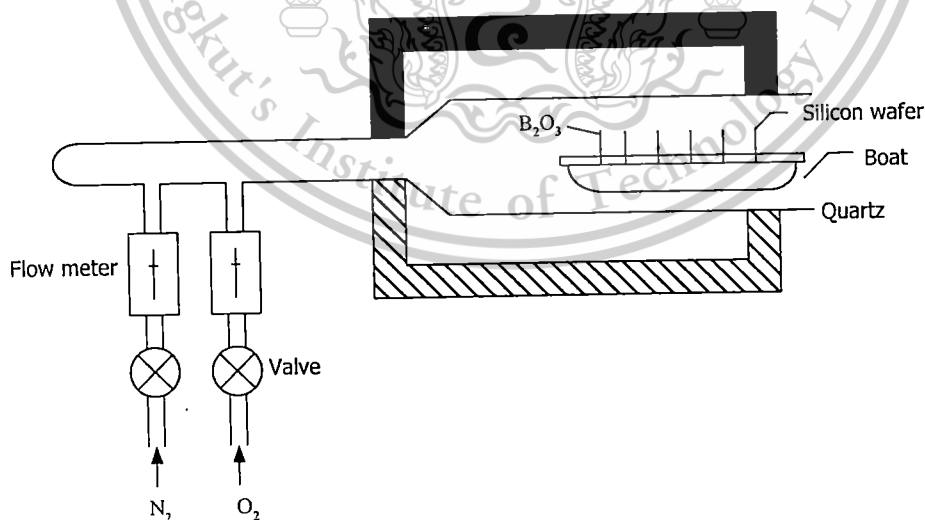
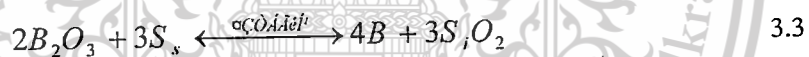
การแพร่สารเจือเป็นกระบวนการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น อีกแบบหนึ่งโดยใช้สารเจือที่มีสภาพเป็น ไอทีก๊าซแพร่เข้าไปแทรกในแผ่นซิลิกอนเกิดเป็นสารกึ่งตัวนำตามชนิดของสารเจือที่นำมาแพร่ใส่ซิลิกอน นั้น ๆ ในกระบวนการแพร่มีอยู่ 2 ขั้นตอนคือ

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

การขับเคลื่อน (Drive-in) เป็นกระบวนการการแพร่ขั้นต่อมาจากการปรีดีโพสิชัน เพื่อให้สารเจือแพร่เข้าไปในซิลิกอนให้ลึกกว่าเดิมและควบคุมลักษณะการกระจายของสารเจือที่แพร่เข้าไปในผลึกซิลิกอน

3.3.1 การแพร่สารเจือชนิดพี

ธาตุที่จะนำมาใช้เป็นสารเจือชนิดพี ที่ใช้กันคือโบรอน (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 แบบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวของซิลิกอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างโบรอนไตรออกไซด์และซิลิกอนโดยเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้



รูปที่ 3.7 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการแพร่สารเจือชนิดพี

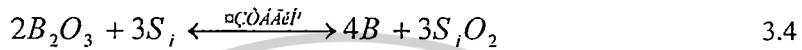
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

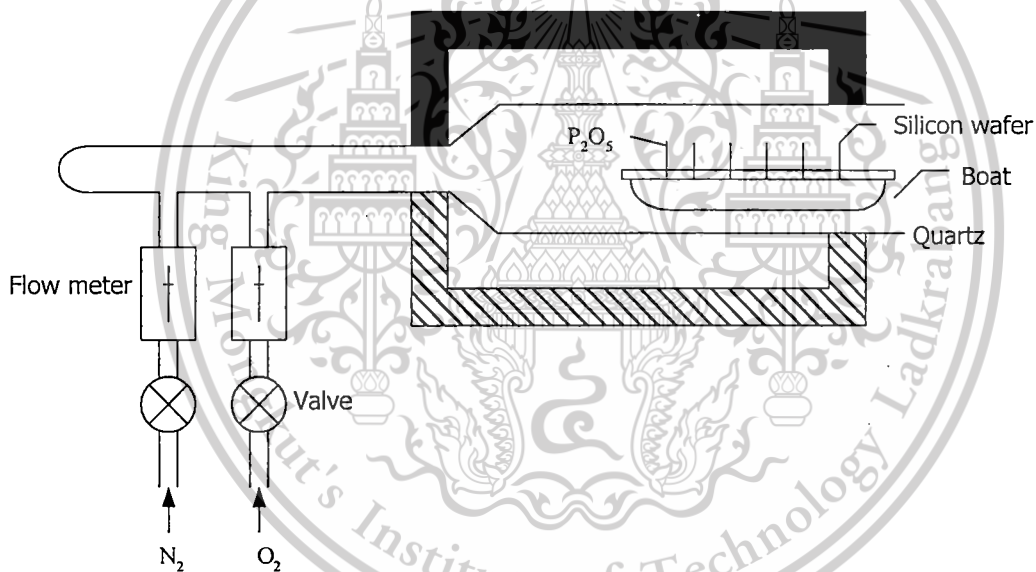
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3.2 การแพร่สารเจือชนิดอื่น

ธาตุที่นำมาใช้เป็นสารเจือชนิดอื่นที่ใช้ในที่นี้คือ ฟอสฟอรัส(Phosphorus) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ เพราะว่ามีสัมประสิทธิ์การแพร่สูง การแพร่ฟอสฟอรัสสามารถทำได้ 3 ลักษณะคือ ในสถานะของแข็ง ฟอสฟอรัสเพนต็อกไซด์(P_2O_5) ในลักษณะของเหลวคือ ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์($POCl_3$) ในลักษณะก๊าซคือ ก๊าซฟอสฟีน(PH_3) ปฏิกิริยาซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวของซิลิกอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างฟอสฟอรัสเพนต็อกไซด์(P_2O_5) และซิลิกอนทำได้โดยการแยกตัวของฟอสฟอรัสออกจาก P_2O_5 ที่ผิวของซิลิกอนเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้



จากนั้นฟอสฟอรัสจึงแพร่เข้าไปในเนื้อซิลิกอนอุปกรณ์ที่ใช้ในการแพร่ฟอสฟอรัสแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการแพร่สารเจือชนิดอื่น

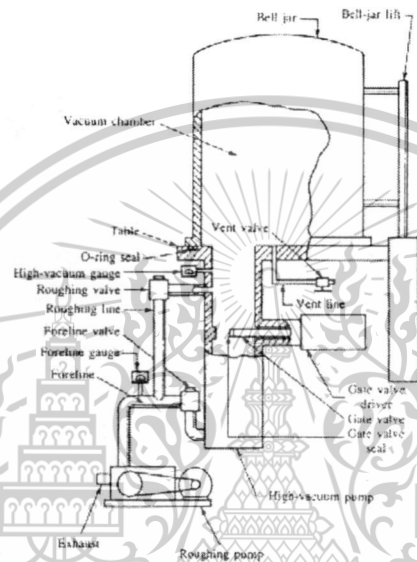
3.4 กระบวนการเมทัลไลเซชัน(metallization) ด้วยการทำให้วาโปเลชัน (Evaporation process)

กระบวนการเมทัลไลเซชันคือ กระบวนการสร้างชั้นโลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับ ขั้วไฟฟ้าหรือแถบตัวนำเชื่อมต่อภายในหน้าที่ของมันเป็นคือเป็นขั้วสัมผัส(Metal contact) ของส่วนต่างๆของ อุปกรณ์ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งในที่นี้จะใช้กระบวนการที่เรียกว่า กระบวนการทำให้วาโปเลชัน โดยเป็นวิธีการที่ใช้กันมานานแล้วในการเคลือบ โลหะเป็นฟิล์ม โดยให้ความร้อนแก่ลูมิเนียมจนระเหยกลายเป็นไอจนไปเคลือบที่แผ่นซิลิกอนเป็นฟิล์มบางๆ โดยจะมีขั้นตอนคร่าวๆดังนี้

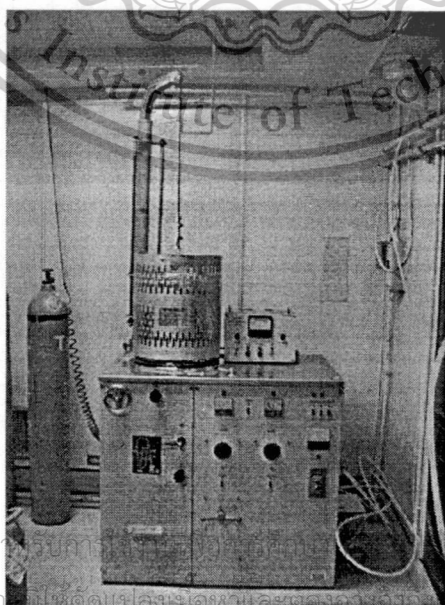
1. นำแผ่นซิลิกอนที่ทำความสะอาดแล้วใส่เข้าไปในครอบแก้วสุญญากาศที่คู่อากาศได้ค่าความดันตามต้องการแล้ว

2. นำลูมิเนียมวางลงบนเส้นลวดความร้อนซึ่งอาจเป็นลวดทังสเตนเรียกว่า โป๊ต (Boat) แล้วปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจนลูมิเนียมระเหยกกลายเป็นไอกระจายไปทั่วจนเคลือบที่แผ่นซิลิกอน

3. เมื่อทำการเคลือบได้ความหนาตามต้องการแล้วซึ่งคิดตามเวลาและความดันภายในแกลมเบอร์ (Chamber) โดยสามารถควบคุมได้โดยการเติมก๊าซไนโตรเจนเหลวเพื่อควบคุมสภาวะความร้อน



รูปที่ 3.9 แสดงหลอดสุญญากาศที่ใช้ในกระบวนการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (Evaporation) ซึ่งประกอบด้วย Vacuum Chamber, roughing pump, high-vacuum pump และ various value and vacuum gauges



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตและต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.10 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (Evaporation)

บทที่ 4

การออกแบบโครงสร้างทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก

จากทฤษฎีของทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก คือการใช้หลักการไบอัสทรานซิสเตอร์ด้วยแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง โดยใช้หลักการฉีดของประจุพาหะในส่วนที่เป็นเบสและนำไปประยุกต์ใช้กับการตรวจจับ สัญญาณแม่เหล็กโดยให้เส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านแล้ววัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเลกเตอร์

โครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ตรวจสอบสัญญาณแม่เหล็กสามารถแบ่งได้ 2 แบบคือ ทรานซิสเตอร์เซ็นเซอร์แม่เหล็กตามแนวตั้ง โดยอาศัยการไหลของพาหะแม่เหล็กในแนวตั้ง และ ทรานซิสเตอร์เซ็นเซอร์แม่เหล็กตามขวาง โดยอาศัยการไหลของพาหะในแนวตั้งและแนวขวางตามลำดับ ในการตอบสนองจะใช้หลักการของแรงลอเรนซ์ในการไหลของพาหะ ดังสมการ

4.1

และปฏิกิริยารวมตัวกันของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า

4.2

โดย

คือความหนาของเส้นแรงแม่เหล็ก

คือความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก

คือ Magnetization

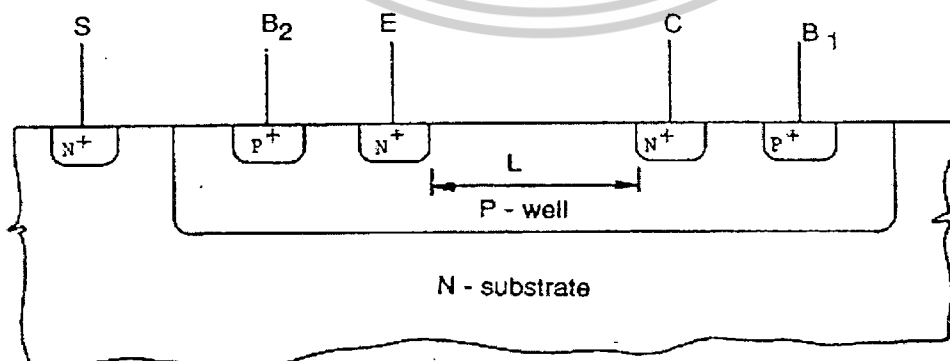
คือ permeability ของสุญญากาศ

และในวัสดุที่ไม่เป็นแม่เหล็ก เช่น ซิลิกอน จะมี

จะได้

4.3

โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แม่เหล็กตามขวางสามารถออกแบบได้หลายแบบดังตัวอย่างภาพดังนี้



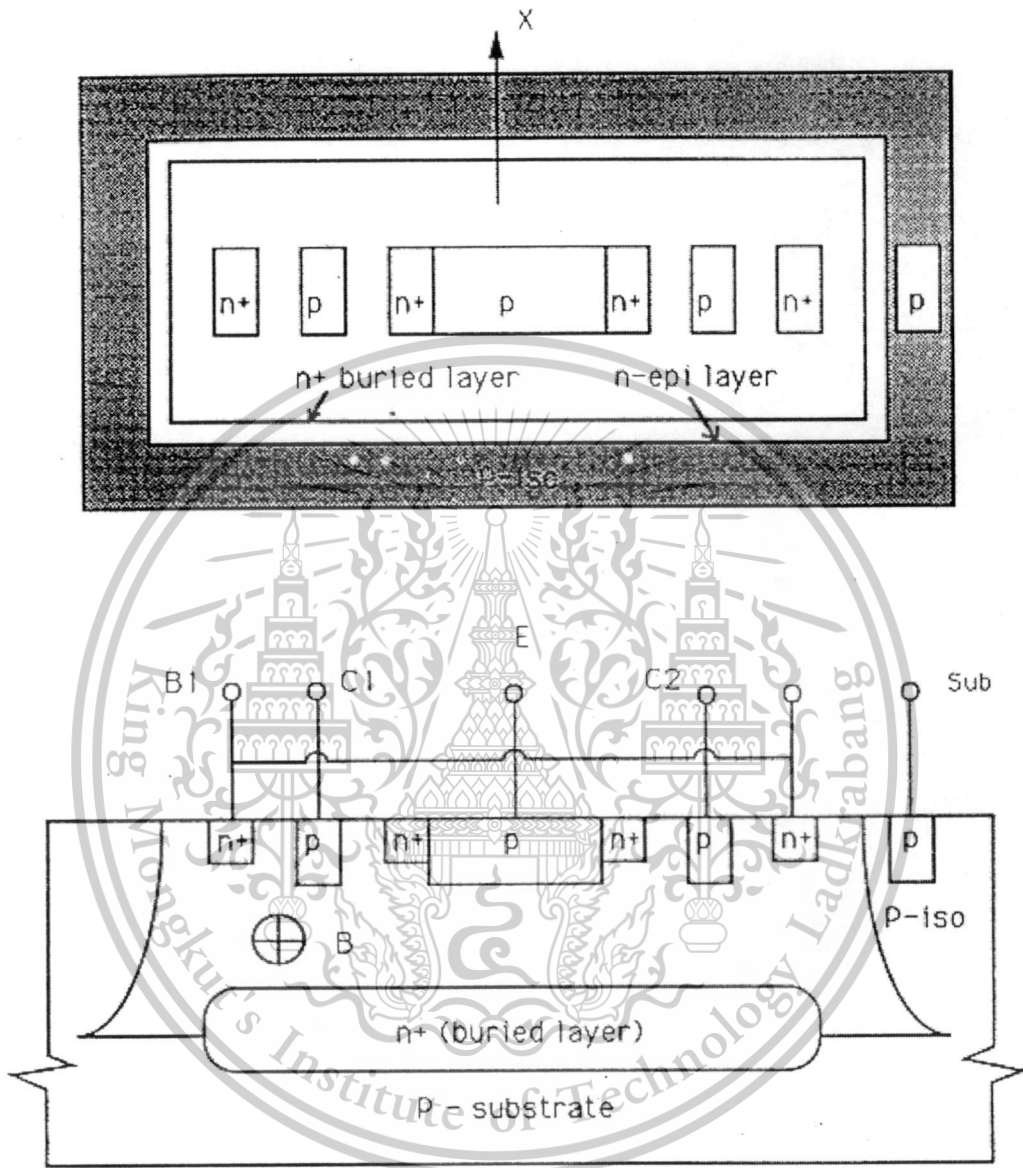
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 แสดง n-p-n ทรานซิสเตอร์แม่เหล็กชนิดตามขวางใน CMOS เทคโนโลยี

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

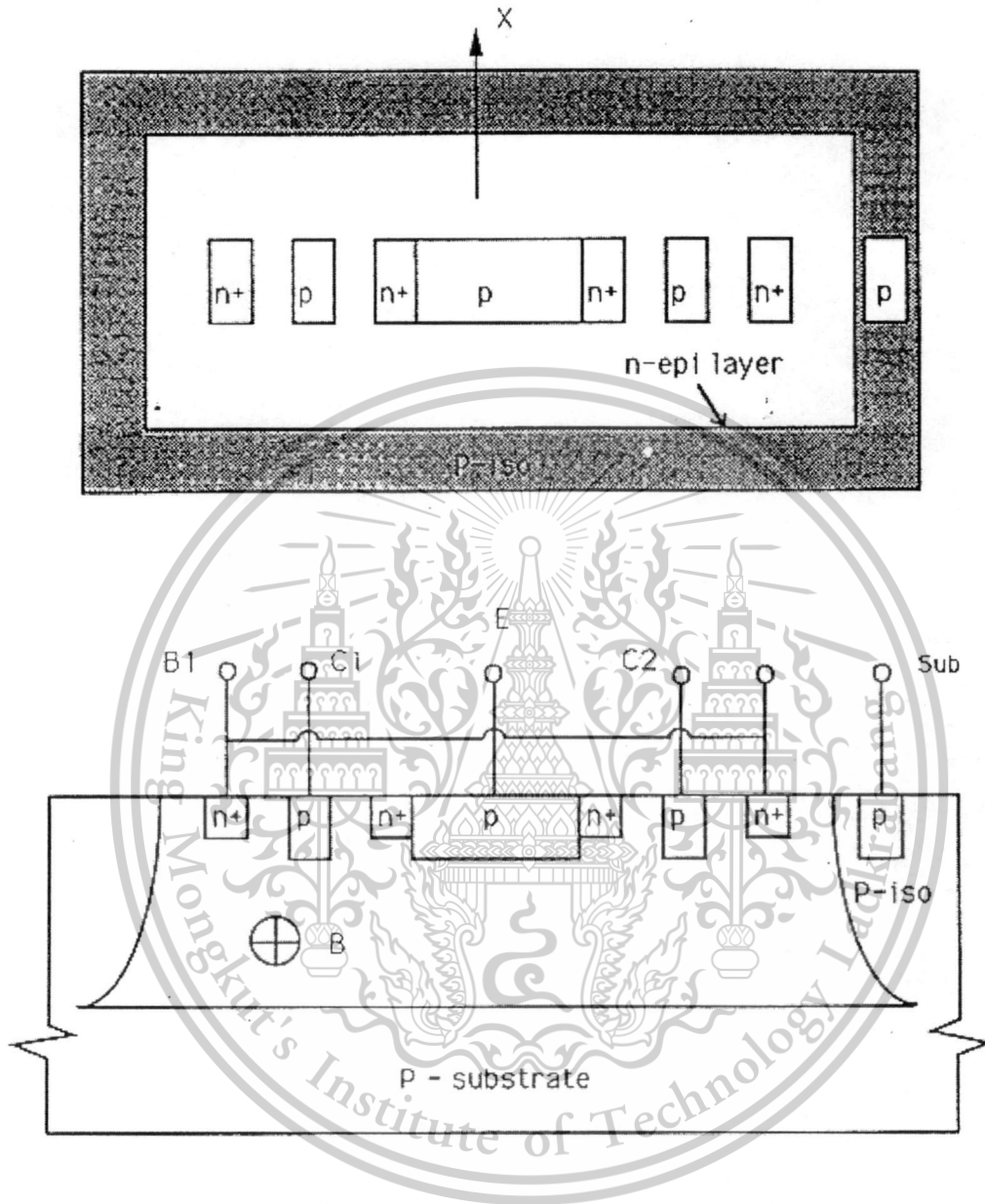


รูปที่ 4.3 แสดง n-p-n ทรานซิสเตอร์แม่เหล็กชนิดตามขวางแบบมีชั้นอิพิทาซีในไบโพลาร์เทคโนโลยี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

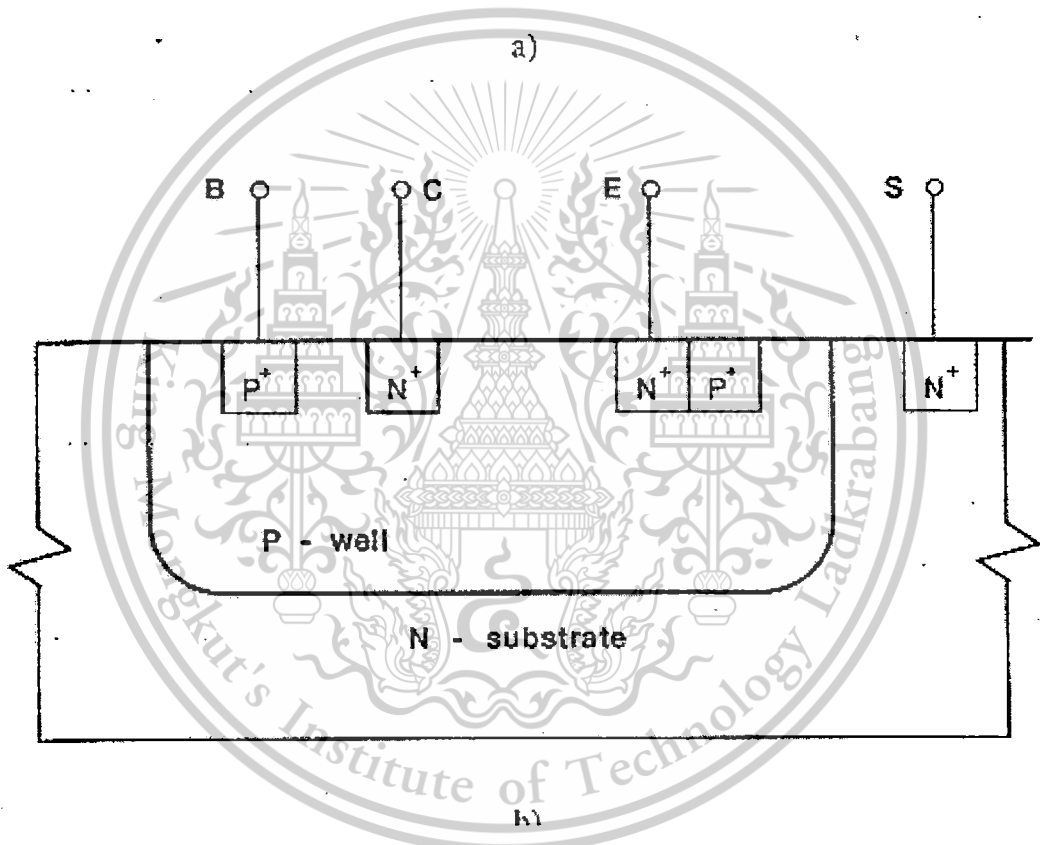
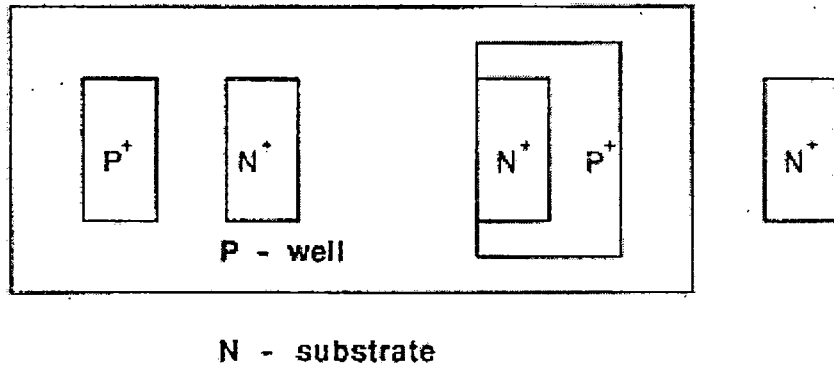


รูปที่ 4.4 แสดง n-p-n ทรานซิสเตอร์แม่เหล็กชนิดตามขวางแบบไม่มีชั้นอิพิทาซีในไบโพลาร์เทคโนโลยี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

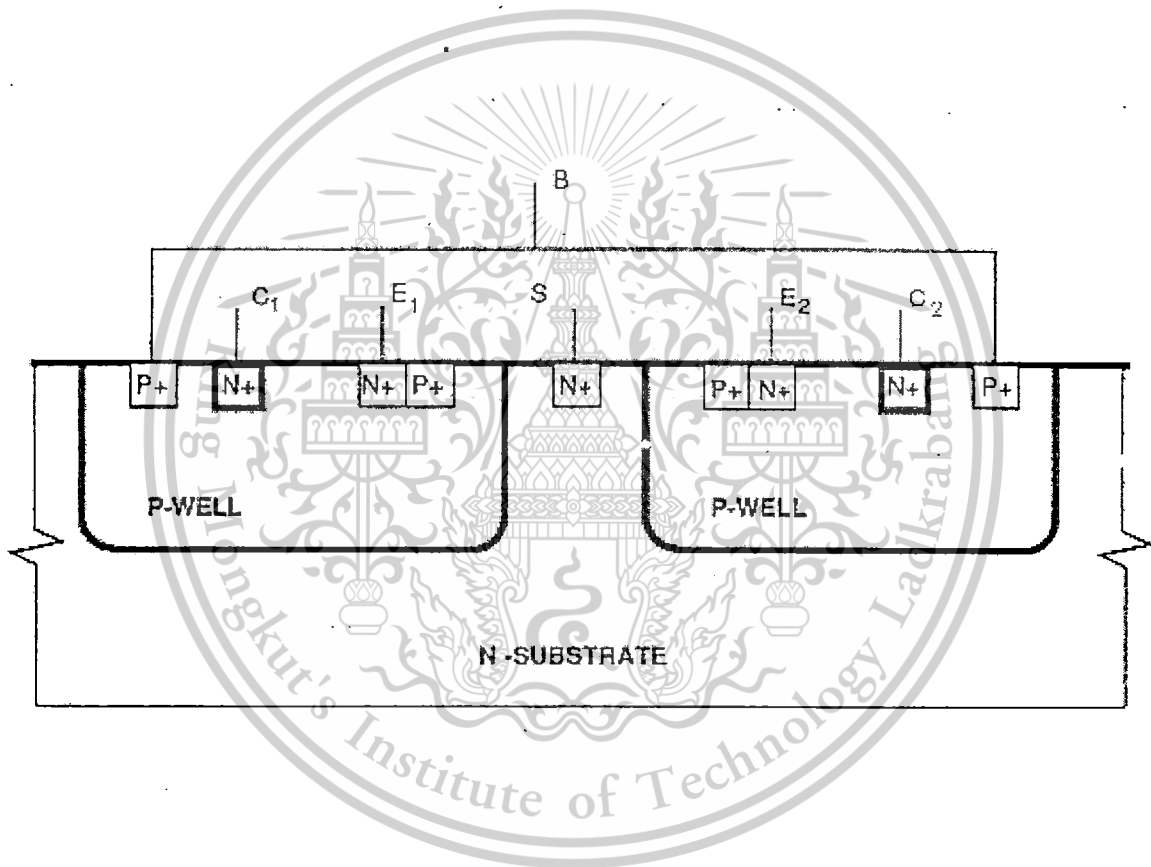
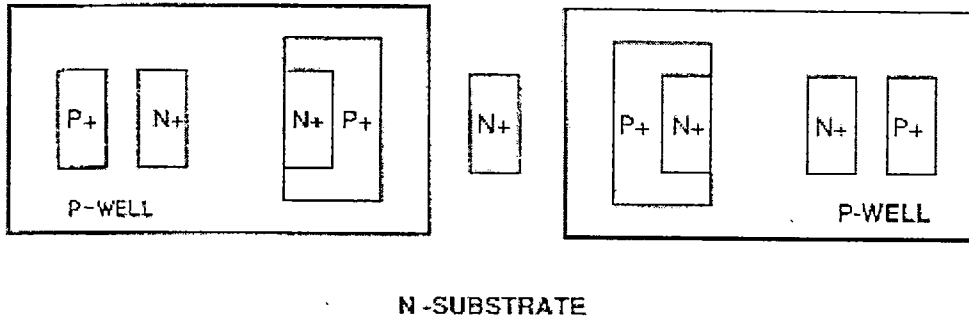


รูปที่ 4.5 แสดง n-p-n ทรานซิสเตอร์แม่เหล็กชนิดตามขวางแบบไซด์เวลเดียวใน CMOS เทคโนโลยี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

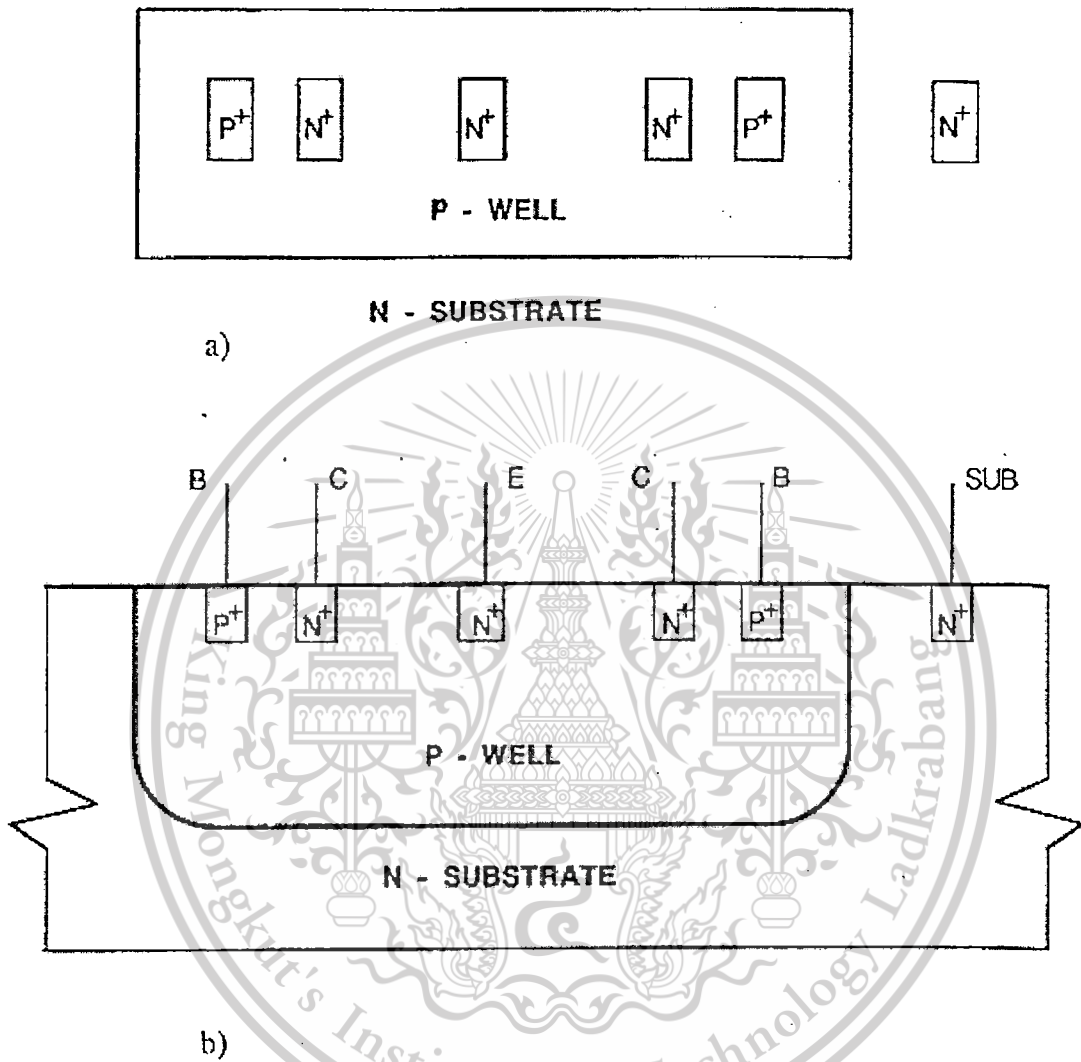


รูปที่ 4.6 แสดง n-p-n ทรานซิสเตอร์แม่เหล็กชนิดตามขวางแบบไซค์เวลดียวแบบสมมาตรใน CMOS เทคโนโลยี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



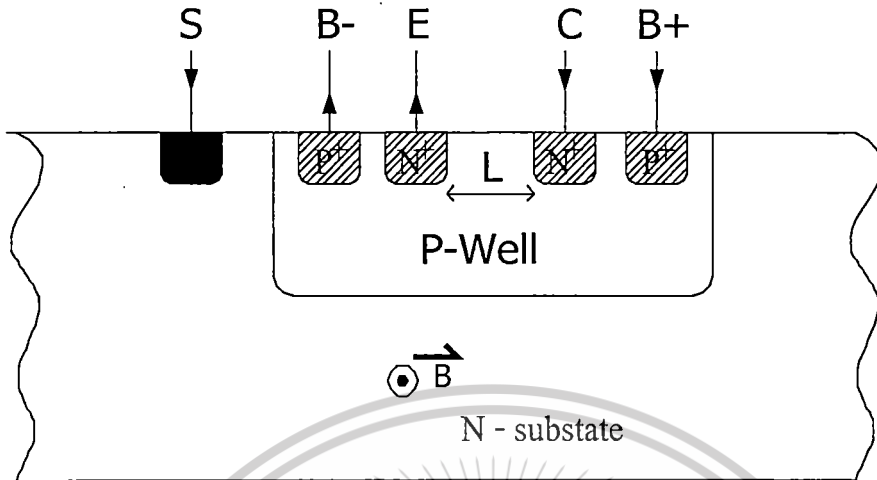
รูปที่ 4.7 แสดง n-p-n ทรานซิสเตอร์แม่เหล็กชนิดตามขวางแบบสมมาตรใน CMOS เทคโนโลยี

แบบที่โครงงานนี้เลือกใช้ทำการทดลองจะเป็นโครงสร้างของแม่เหล็กชนิดทรานซิสเตอร์ชนิด n-p-n ทรานซิสเตอร์แม่เหล็กชนิดตามขวางใน CMOS เทคโนโลยี ดังรูปตัวอย่างที่ 4.1 ด้วยเหตุผลที่ว่ามีความสะดวกในการสร้างและการทดลองไปอีต จะมัลักษณะของภาพตัดขวางดังรูปที่ 4.8

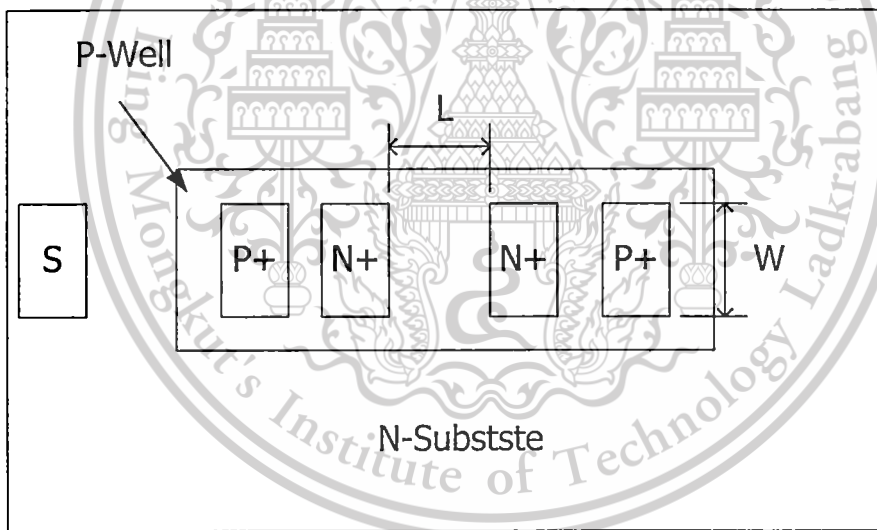
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.8 แสดงภาพตัดขวางของทรานซิสเตอร์แม่เหล็กที่ออกแบบเพื่อทดลอง



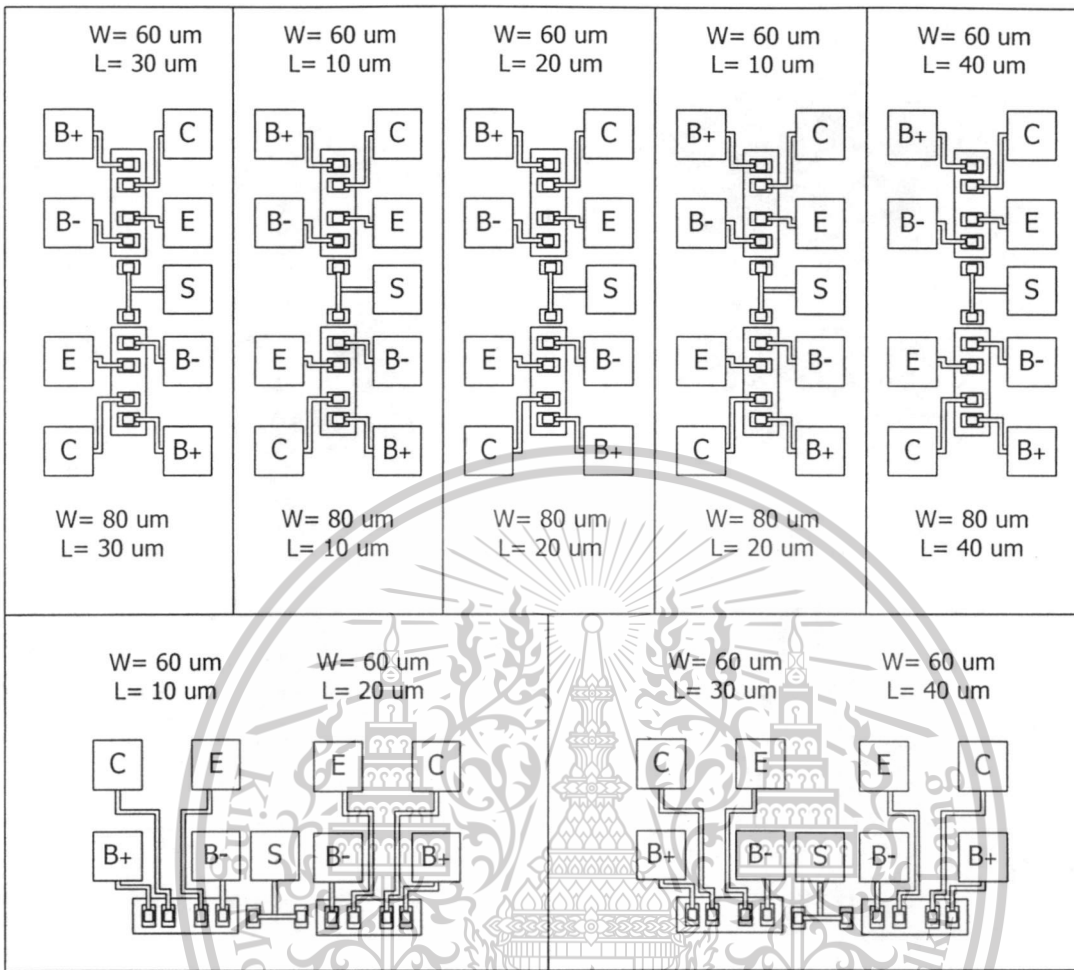
รูปที่ 4.9 แสดงภาพด้านบนของทรานซิสเตอร์แม่เหล็กที่มีความยาว L และกว้าง W

การทดลองจะทำการออกแบบให้มีขนาดความยาว L และกว้าง W ที่แตกต่างกันไปตั้งแผนภาพ
 ทั้งนี้เพื่อทดสอบหาความเป็นไปได้ที่ว่าขนาดแตกต่างกันมีความสามารถในการเซนส์ที่ต่างกันเพื่อหา
 ตัวทรานซิสเตอร์ที่เหมาะสมในการใช้งานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.10 แสดงแผนภาพการวางตั้งอุปกรณ์ในการสร้างลงบนแผ่นซิลิกอน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่แนะนำให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

รูปที่ 4.11 แสดงกล่องใส่กระเบื้องมาดักหลังกระบวนการออกแบบที่พร้อมใช้งาน

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

ขั้นตอนการสร้างทรานซิสเตอร์แม่เหล็กด้วยเทคโนโลยี ซีมอส

ในกระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์แม่เหล็กจะเป็นวิธีการทำโดยใช้การสร้างแบบ ซีมอส ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมีวิธีการหลักๆ เช่น โฟโตลิโทกราฟี ออกซิเดชัน การแพร่สารเจือด้วยความร้อน การทำอิวาโปเลชัน การทำซินเตอร์ริง เป็นต้น โดยลำดับขั้นตอนการสร้างจะมีวิธีการดังต่อไปนี้

1. ทำการเตรียมแผ่นซิลิกอนและตรวจสอบคุณสมบัติ

แผ่นซิลิกอนชนิด n มีระนาบ (111)

พิคัดความต้านทาน 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 Trichoethylene 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

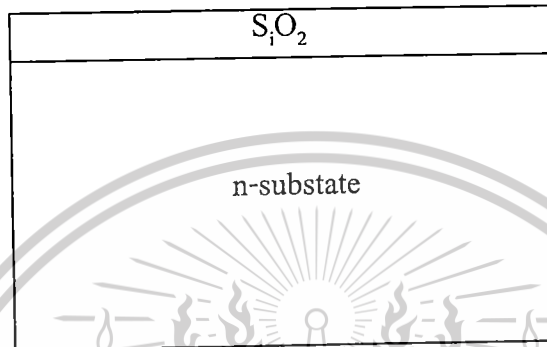
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5. กระบวนการออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิ 1150 องศา อุณหภูมิน้ำ 90 °C

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 °C 30 นาที

6.2 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ spin 5000 rpm

6.3 อบฟิล์มที่ 95 °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

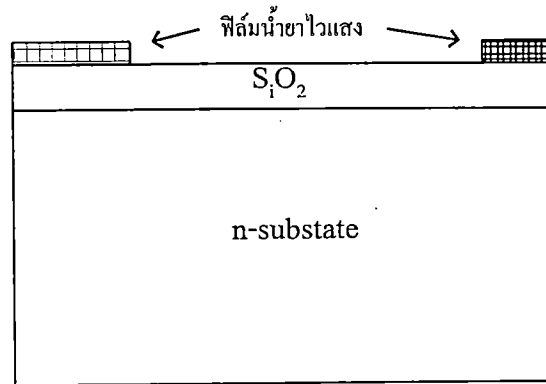
6.5.6 จุ่มน้ำบริสุทธิ์ แก้วที่หนึ่งและสอง

6.5.7 เป่าแห้งด้วย N_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.2 แสดงการถ่ายมาร์กเพื่อสกัดชั้นออกไซด์โดยเคลือบน้ำยาไวแสงแล้ว

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 Trichloethylene 5 นาที
- 9.2 Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- 9.3 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง และสอง
- 9.4 เป่าแห้งด้วย N_2

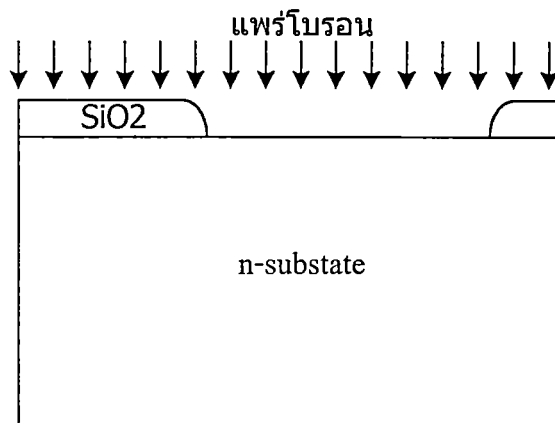
10. ทำการ Slice etching

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.3 แสดงแผ่นซิลิคอนหลังจากสกัดชั้นออกไซด์ออกแล้วทำการแพร่โบรอนเข้าไป

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

11.1 Activate Source ด้วย O₂ 700 CC/mm 30 นาที

11.2 Stabilize Source ด้วย N₂ 700 CC/mm 30 นาที

11.3 Deposit ด้วย N₂ 700 CC/mm 20 นาที

11.4 สร้าง Boron glass ด้วย O₂ 700 CC/mm 5 นาที

12. ทำการลอกชั้น Boron glass

12.1 จุ่มในสารละลาย HF 5 % 10 วินาที

12.2 จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง และสอง

12.3 เป่าแห้งด้วย N₂

13. ทำความสะอาดผิวหน้าแบบมาตรฐาน

14. ทำการ Boron Drive in Temp. 1100 °C

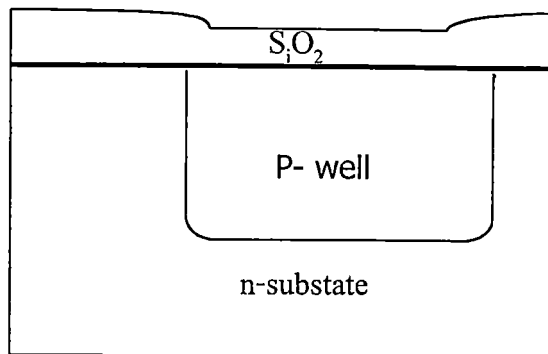
14.1 Dry O₂ 1000 cc/min 8 ชั่วโมง

14.2 Dry N₂ 1000 cc/min 12 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

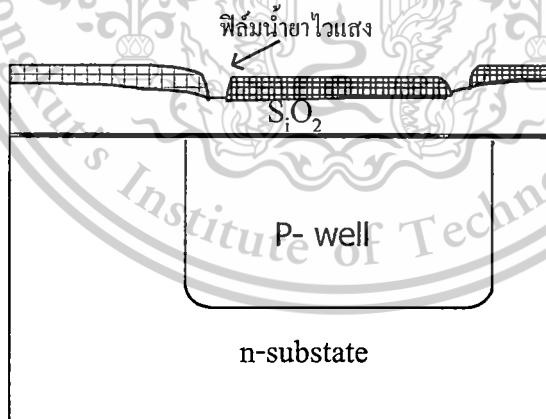
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.4 แสดงหลังจากทำการแพร่สารเจือและทำการขั้วตี๊กแล้ว

15. ทำโฟโตลิโทกราฟี มาร์กที่ 2 (แพร่เป็นP⁺)

- 15.1 อบแผ่นไล่ความชื้น ที่ 120 °C 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

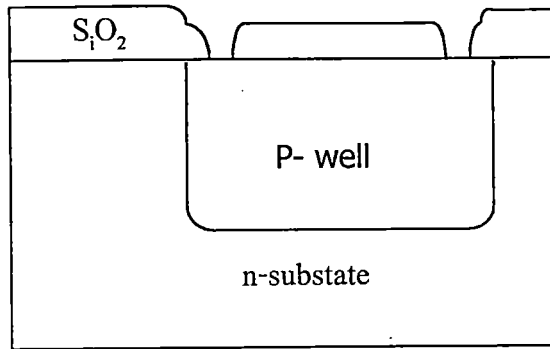


รูปที่ 5.5 แสดงโฟโตลิโทกราฟี มาร์กที่ 2 เพื่อสกัดชั้นออกไซด์ออก

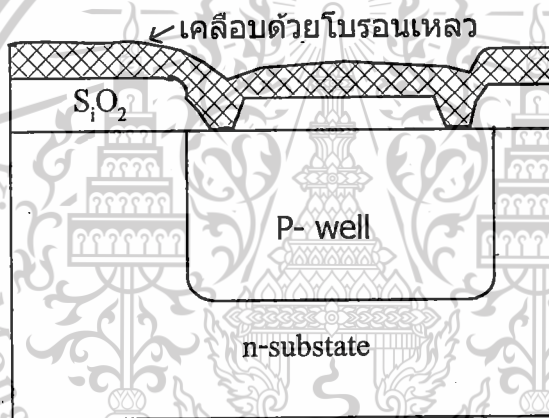
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.6 แสดงการสกัดชั้นออกไซด์ออกแล้วเพื่อทำการแพร่สารเจือต่อไป



รูปที่ 5.7 แสดงการเคลือบสารเจือโดยใช้โบรอนเหลว

16. ทำ Oxide Etching

17. ทำกระบวนการลอกฟิล์ม

18. ทำการทำความสะอาดผิวหน้าแบบมาตรฐาน

19. ทำการ Boron deposition ที่ Temp. 950 °C

19.1 เคลือบแผ่นด้วย โบรอนชนิดน้ำ แล้วสปีน 5000 รอบ/นาทีนาน 10 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษานานาชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

19.2 อบแผ่น ไล่ความชื้น นาน 10 นาทีที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19.3 Deposit ด้วย N_2 700 cc/min นาน 20 นาที

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

19.4 สร้าง Boron glass ด้วย O_2 700 cc/min นาน 5 นาที

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

20. ลอกชั้น Boron glass

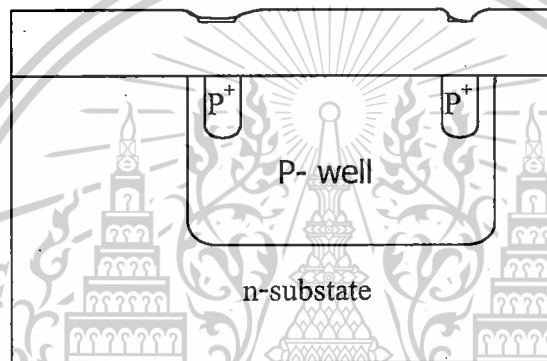
21. ทำความสะอาดผิวหน้าแบบมาตรฐาน

22. ทำการ Drive in Boron ด้วย Temp. 1100 °C

22.1 Dry O₂ 1200 cc/min นาน 20 นาที

22.2 Wet O₂ 1200 cc/min นาน 20 นาที

22.3 Dry O₂ 1200 cc/min นาน 20 นาที



รูปที่ 5.8 แสดงแผ่นซิลิคอนหลังจากขับลึกเกิดเป็น 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

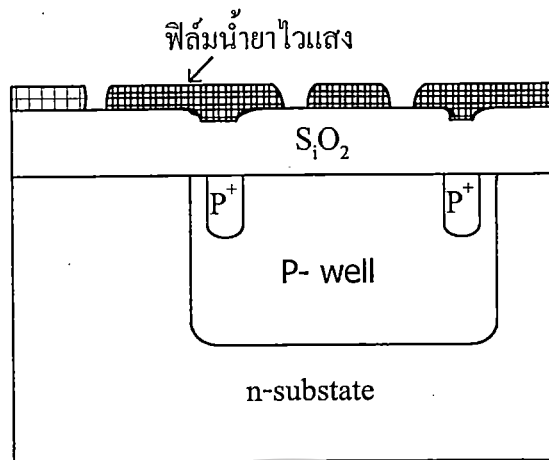
23.4 Alignment Expose

23.5 Develop Film

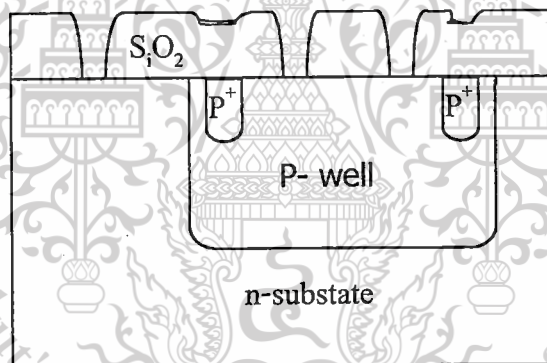
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.9 แสดงเคลือบฟิล์ม โดยสกัดชั้นฟิล์มออกตรงบริเวณที่จะสร้างเป็นขั้ว N^+



รูปที่ 5.10 แสดงการสกัดชั้นออกไซด์ออกแล้ว

24. ทำ Oxide Etching

25. ทำกระบวนการลอกฟิล์ม

26. ทำความสะอาดผิวหน้ามาตรฐาน

27. ทำ Phosphorus Deposition Temp. 1050 °C

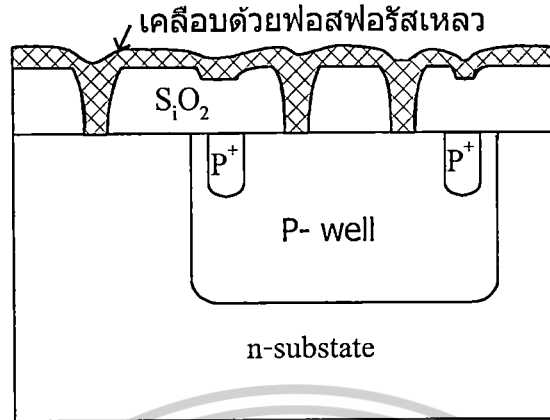
27.1 เคลือบแผ่นด้วยฟอสฟอรัสชนิดน้ำ แล้วสปีน 5000 รอบ/นาทีนาน 10 วินาที

27.2 อบแผ่นไล่ความชื้น นาน 10 นาทีที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

27.3 Deposit ด้วย N_2 700 cc/min นาน 20 นาที

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.11 แสดงการเคลือบสารเจือฟอสฟอรัสเหลว

28. ลอกชั้น Phosphorus glass

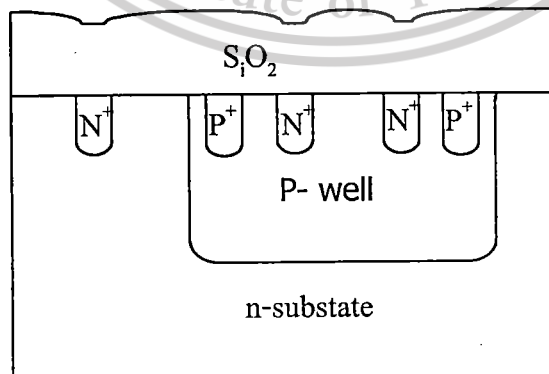
29. ทำความสะอาดผิวหน้ามาตรฐาน

30. ทำการ Phosphorus drive in Temp. 1100°C

30.1 Dry O_2 1200 cc/min นาน 20 นาที

30.2 Wet O_2 1200 cc/min นาน 20 นาที

30.3 Dry O_2 1200 cc/min นาน 20 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.12 แสดงหลังทำการขับลึกฟอสฟอรัสเหลวที่อุณหภูมิ 1100°C เกิดเป็นขั้ว N^+
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

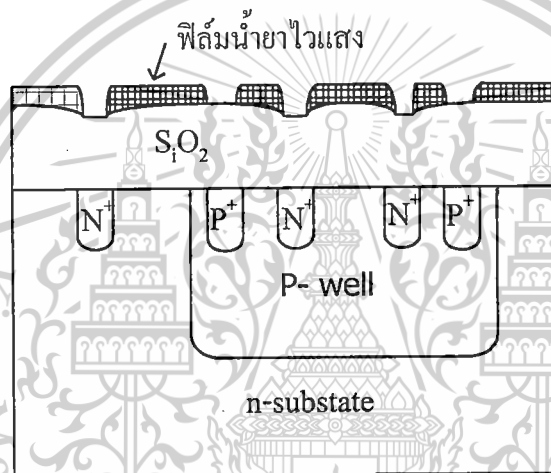
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

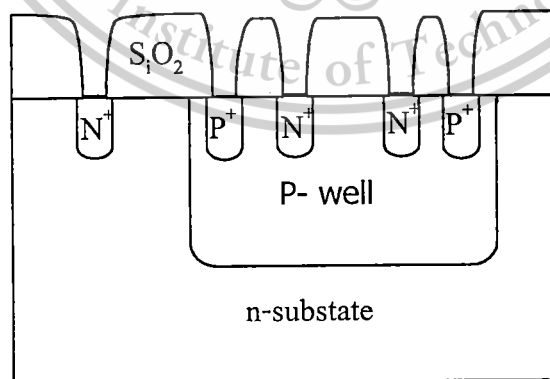
31. ทำกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมาร์คที่ 4

- 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 แสดงการเปิดมาร์คคอนเทค โดยเคลือบน้ำยาไวแสงแล้วถ่ายมาร์คพร้อมทั้งสกัดชั้นน้ำยาไวแสง



รูปที่ 5.14 แสดงการสกัดชั้นออกไซด์ออกแล้วเพื่อทำการเคลือบอลูมิเนียมต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลีโอนังห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

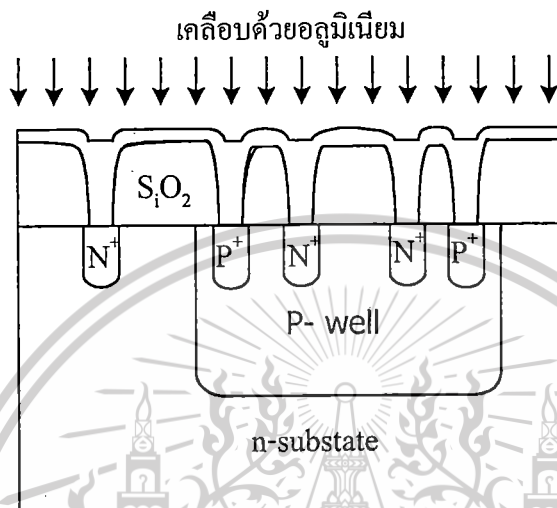
33. ทำกระบวนการลอกฟิล์ม

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

34. ทำความสะอาดผิวหน้ามาตรฐาน

35. ทำการเคลือบชั้นออกไซด์ในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator ที่ความดัน 2×10^{-6} Torr



36. ทำกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมาร์กที่ 5

36.1 อบแผ่นใสความชื้นที่ 120°C นาน 30 นาที

36.2 เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก spin 5000 rpm

36.3 อบฟิล์มที่ 85°C นาน 20 นาที

36.4 Alignment Expose

36.5 Develop Film

37. ทำการกัดชั้นออกไซด์ (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

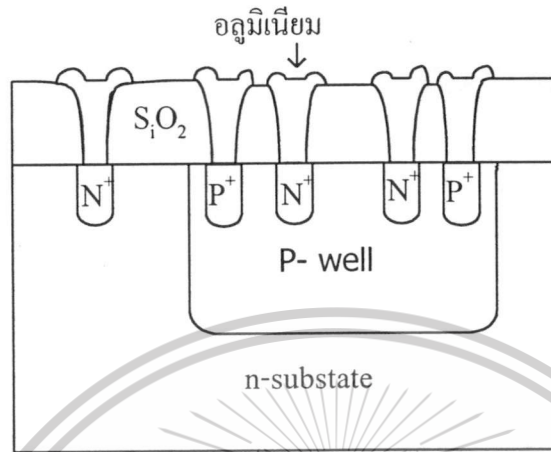
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

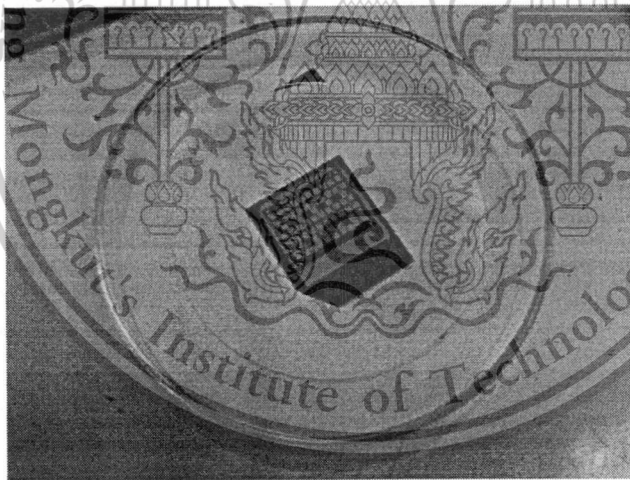
39. ทำการ Sintering Temp. 500°C

39.1 Dry N₂ 1000 cc/min นาน 12 นาที



รูปที่ 5.16 แสดงการสกัดชั้นอลูมิเนียมทำเป็นขั้วต่อ

40. ได้ชิ้นงานที่สำเร็จนำไปทำการทดสอบวิเคราะห์คุณสมบัติต่อไป



รูปที่ 5.17 แสดงรูปชิ้นงาน ทรานซิสเตอร์แม่เหล็กตามขวางที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

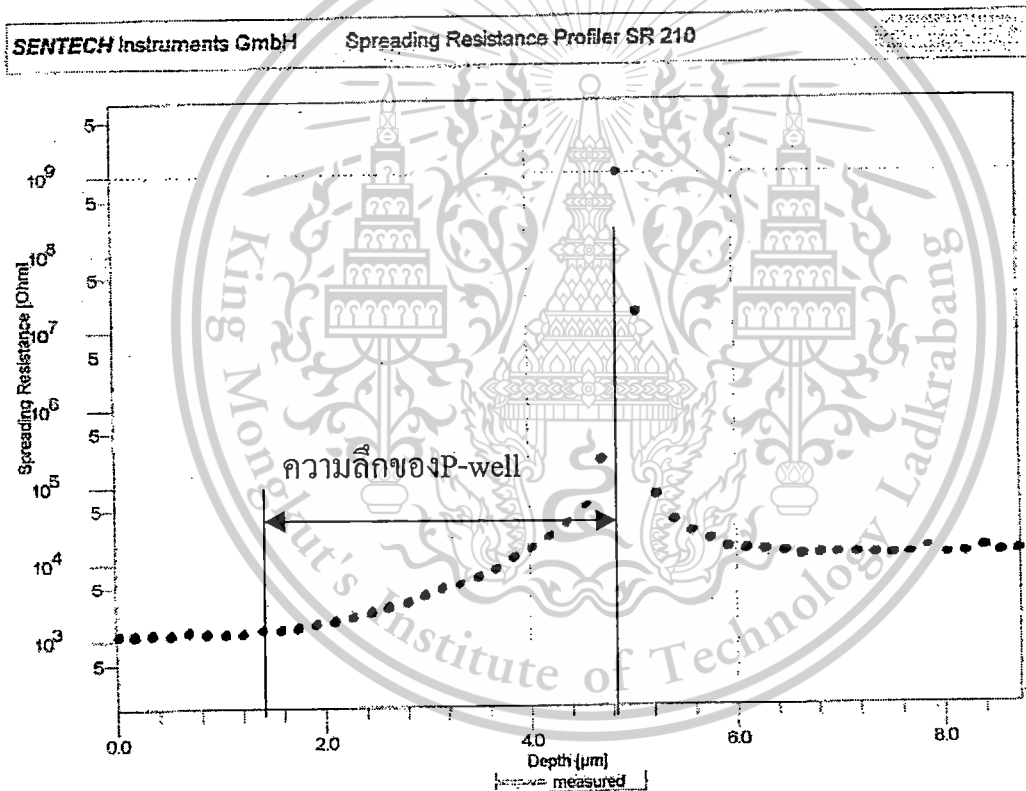
บทที่ 6

การวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก

การวัดและทดสอบคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก จะมีวิธีการต่างๆ ดังต่อไปนี้

6.1 วัดความลึก ของ P-well

การวัดความลึกของหลุมพีเวลด จะใช้วิธีการขุดแผ่นออกเป็นลักษณะเฉียงแล้ววัด โดยใช้เครื่อง Spreading resistance profile SR210 ซึ่งจะปรากฏผลดังในกราฟรูปที่ 6.1 โดยจากกราฟจะเห็นความแตกต่างของความต้านทานตั้งแต่เมื่อเริ่มวัดจนความต้านทานเปลี่ยนไปทำให้ทราบว่าความลึกของพีเวลมีค่าประมาณ 4 ไมครอนนั่นเอง



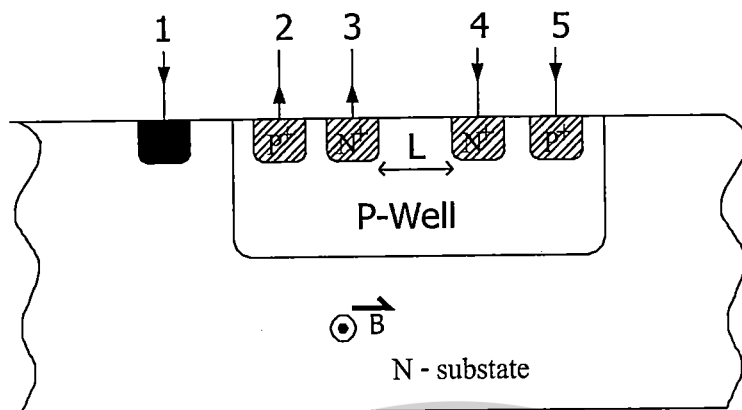
รูปที่ 6.1 กราฟแสดงผลการวัดระดับความลึกของ P-Well

6.2 วัดคุณสมบัติของรอยต่อ P-N ของ แม็กนีโตทรานซิสเตอร์

การทำการวัดคุณสมบัติของรอยต่อของทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก จะทำเพื่อทดสอบว่าทรานซิสเตอร์ที่สร้างขึ้นใช้ได้หรือไม่ ซึ่งเป็นการวัดและทดสอบคุณสมบัติการเกิดเป็นรอยต่อต่างๆรอยต่อโดยการวัดรอยต่อด้วยเครื่อง Transistor-Curve Tracer

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 6.2 แสดง โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แม่เหล็กสำหรับวัดรอยต่อ

1. คุณสมบัติของรอยต่อที่ควรจะเป็นไปตามทฤษฎี

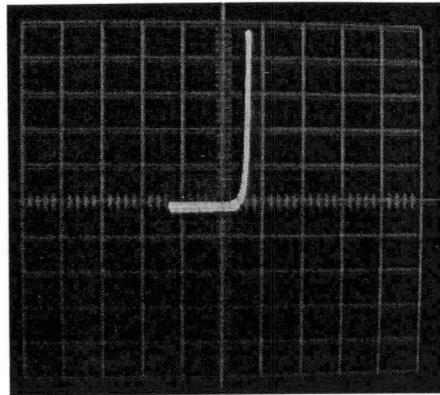
- รอยต่อขั้ว 1-2 มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อพี-เอ็น กราฟเป็นลักษณะของการให้ไบอัสกับไดโอดนั่นเอง
- รอยต่อขั้ว 1-3 มีชั้น P-well ขึ้นอยู่ระหว่างพี กับ เอ็นทำให้ไม่ต่อถึงกัน กราฟจึงมีลักษณะเป็นเส้นตรงไม่ขึ้นกับแรงดันที่ป้อนให้
- รอยต่อขั้ว 1-4 จะเป็นลักษณะเช่นเดียวกับรอยต่อขั้ว 1-3
- รอยต่อขั้ว 1-5 มีคุณสมบัติและกราฟเหมือนกันกับรอยต่อขั้ว 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 ขึ้นอยู่ระหว่างขั้วทั้งสองทำให้ไม่ต่อถึงกัน กราฟจึงมีลักษณะเป็นเส้นตรง
- รอยต่อขั้ว 4-5 มีคุณสมบัติและกราฟเหมือนกันกับรอยต่อขั้ว 1-2

2. กราฟแสดงผลการวัดรอยต่อพีเอ็นของทรานซิสเตอร์สร้างขึ้นด้วยเครื่องเทรเซอร์ (Transistor Curve Tracer) ซึ่งสามารถเปรียบเทียบว่ารอยต่อเป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่ตามข้างต้นที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

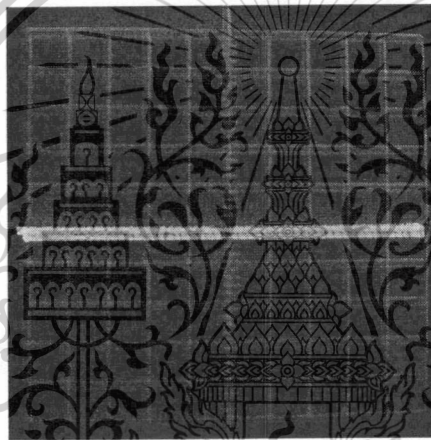
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



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

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

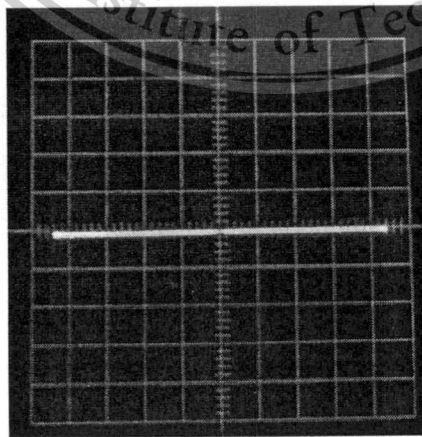
รูปที่ 6.3 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-2



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

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

รูปที่ 6.4 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-3



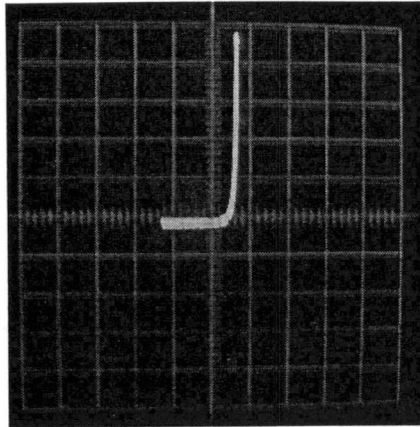
$$\text{Ver(I)} = 0.1\text{mA/div}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รูปที่ 6.5 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-4 เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

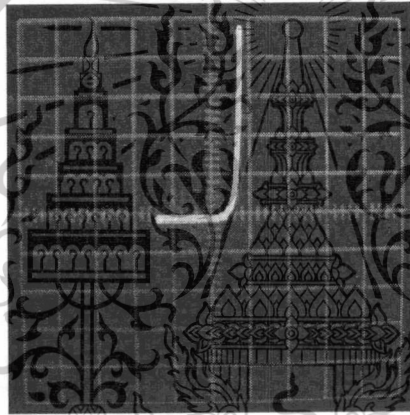
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



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

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

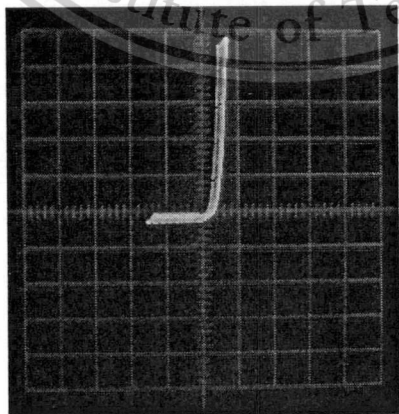
รูปที่ 6.6 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 1-5



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

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

รูปที่ 6.7 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 2-3



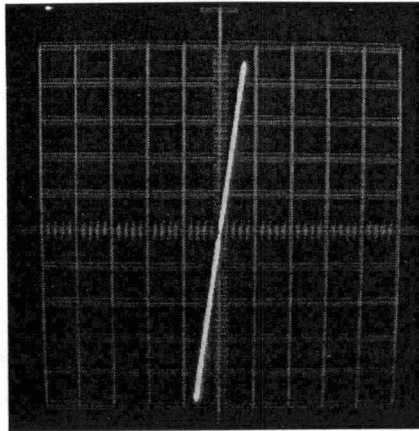
$$\text{Ver}(I) = 0.1\text{mA/div}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รูปที่ 6.8 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 2-4

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

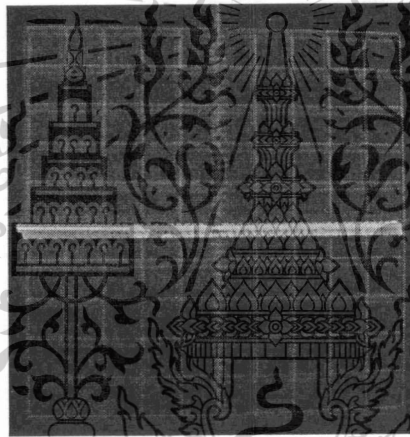
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



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

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

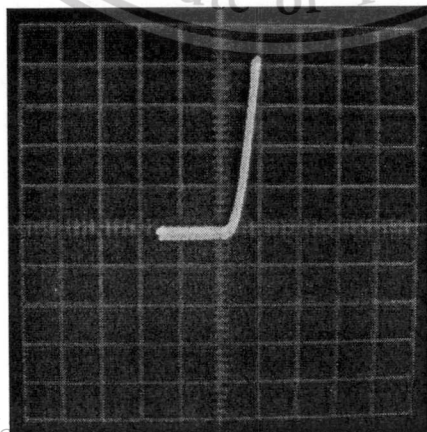
รูปที่ 6.9 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นชั้นที่ 2-5



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

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

รูปที่ 6.10 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นชั้นที่ 3-4



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

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

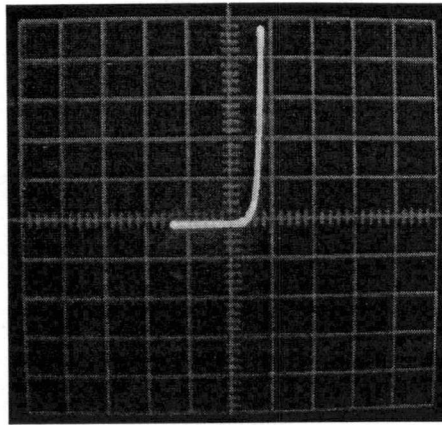
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.11 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นชั้นที่ 3-5

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

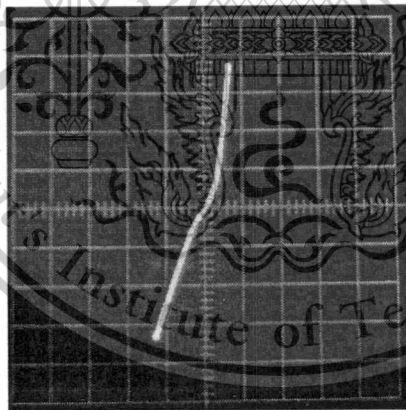


Ver(I) = 0.1mA/div

Hor(V) = 1V/div

รูปที่ 6.12 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 4-5

3. รอยต่อที่มีคุณสมบัติไม่เป็นไปตามคุณสมบัติที่ต้องการ
 รอยต่อที่ไม่เป็นไปตามคุณสมบัติที่ต้องการคือรอยต่อที่มีกระแสรั่วมากเกินไปหรือรอยต่อที่ควร
 จะขาดจากกันแต่กลับมีคุณสมบัติเป็นรอยต่อพีเอ็นแทน ทำให้คุณสมบัติไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ตัวอย่างดัง
 รูปที่ 6.12 และ 6.13



Ver(I) = 0.1mA/div

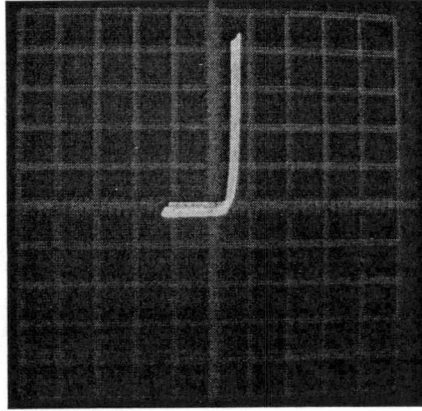
Hor(V) = 1V/div

รูปที่ 6.13 แสดงผลการวัดทดสอบรอยต่อพีเอ็นขั้วที่ 4-5 ที่มีกระแสรั่วมากเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



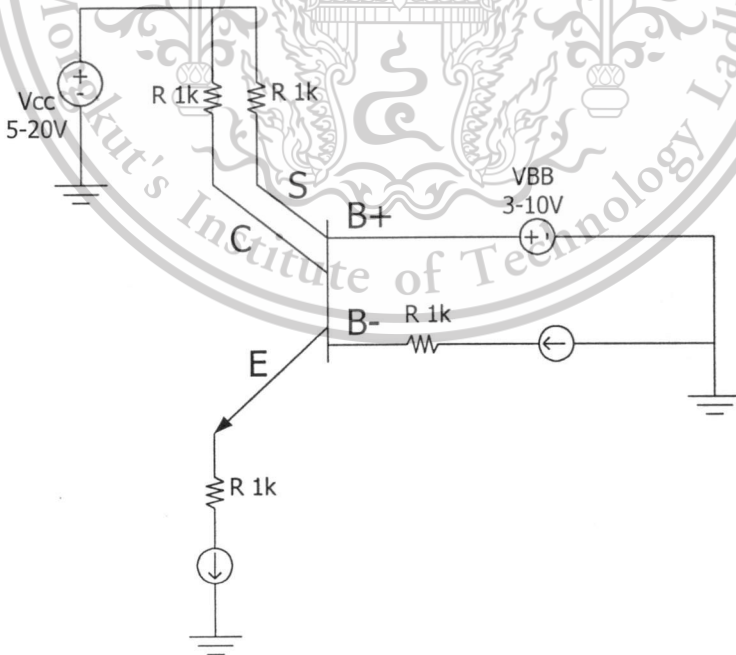
Ver(I) = 0.1mA/div

Hor(V) = 1V/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 บันทึกผล ของกระแส I_C เช่น ตั้งค่า I_B ไว้ที่ 0.2 mA แล้วเปลี่ยนค่า I_E ตั้งแต่ 0.2-0.8 mA บันทึกผล ของกระแส I_C จากนั้นจึงเปลี่ยนค่า I_B เป็น 0.4 mA ทำซ้ำไปเรื่อยๆ ดังแสดงในภาคผนวก ก

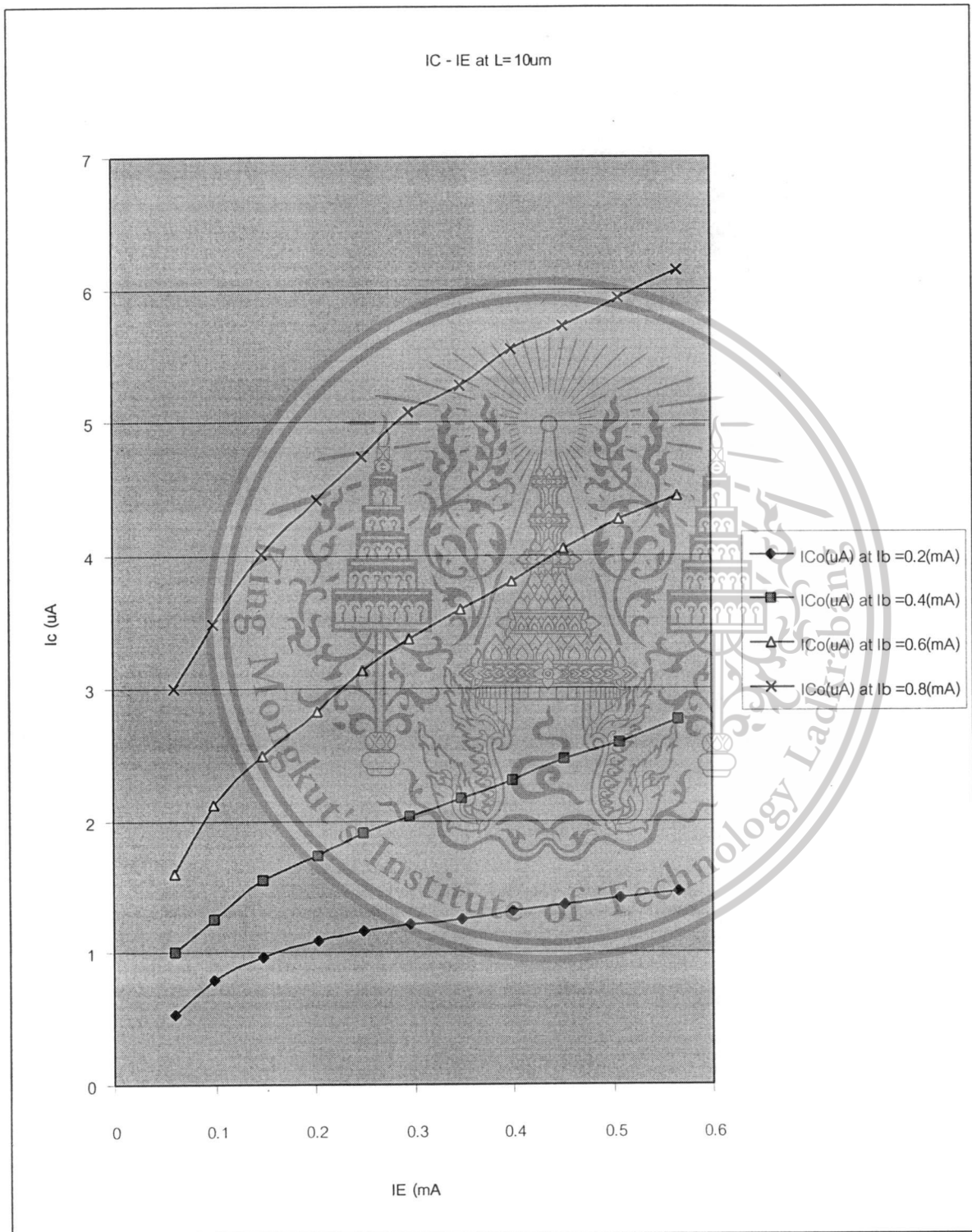


เอกสารนี้เป็นรูปที่ 6.15 แสดงวงจรการให้ไบอัสที่ทรานซิสเตอร์แบบพีเอ็นพีแอมป์ไฟร์เว็รคเอกทีฟโหมด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ถือว่าคุณกระเสด้วยแหล่งจ่ายกระแสตรงที่ จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ซึ่งวิธีการวัดแสดงไว้ในภาคผนวก ข และ ค โดยค่าที่ได้จากการวัดแสดงไว้ในภาคผนวก ก แล้วนำผลการทดลองมาพล็อตกราฟได้ดังนี้

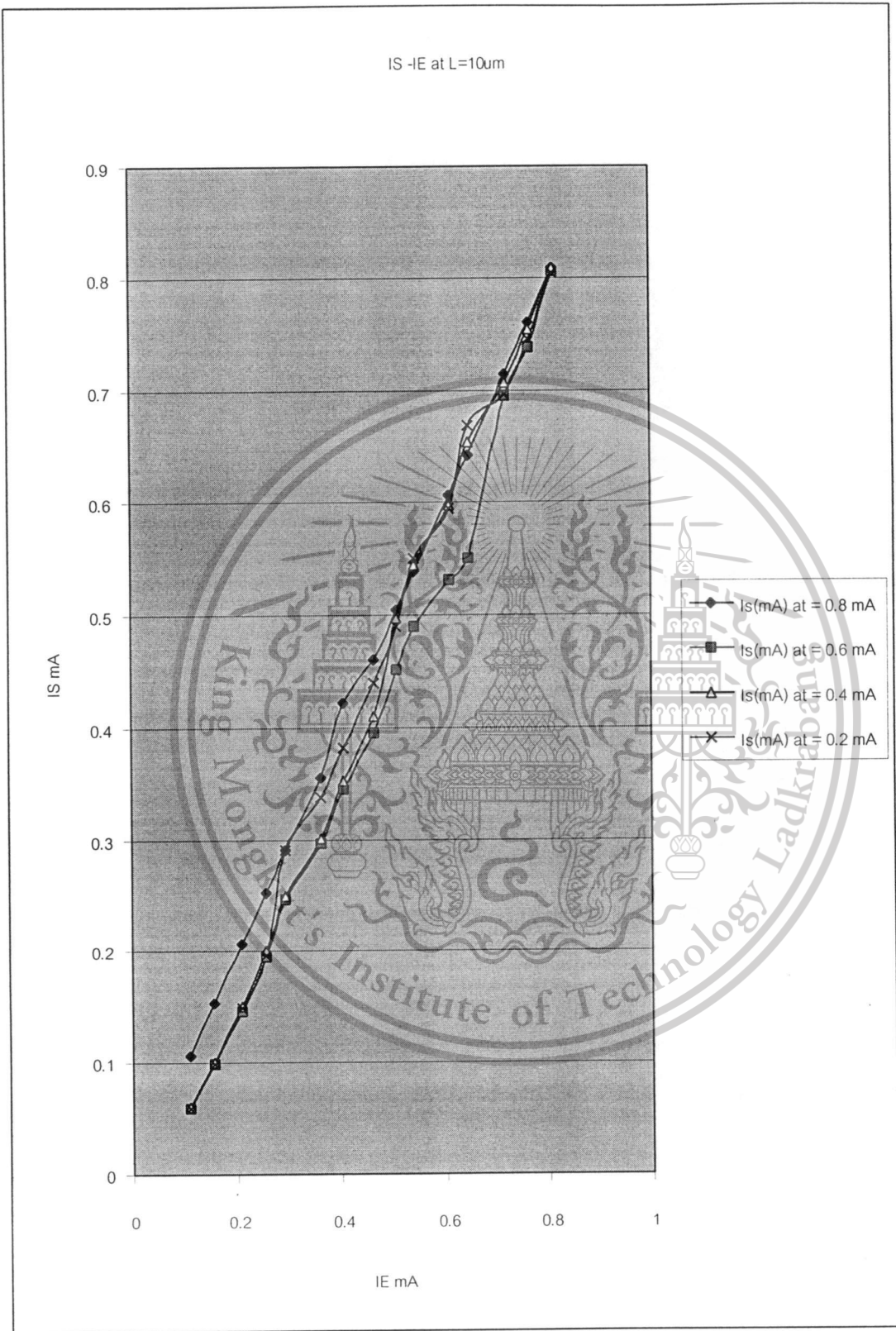


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 6.16 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแสเบส กออดเตกเตอร์

This material is responsible for educational use only. Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

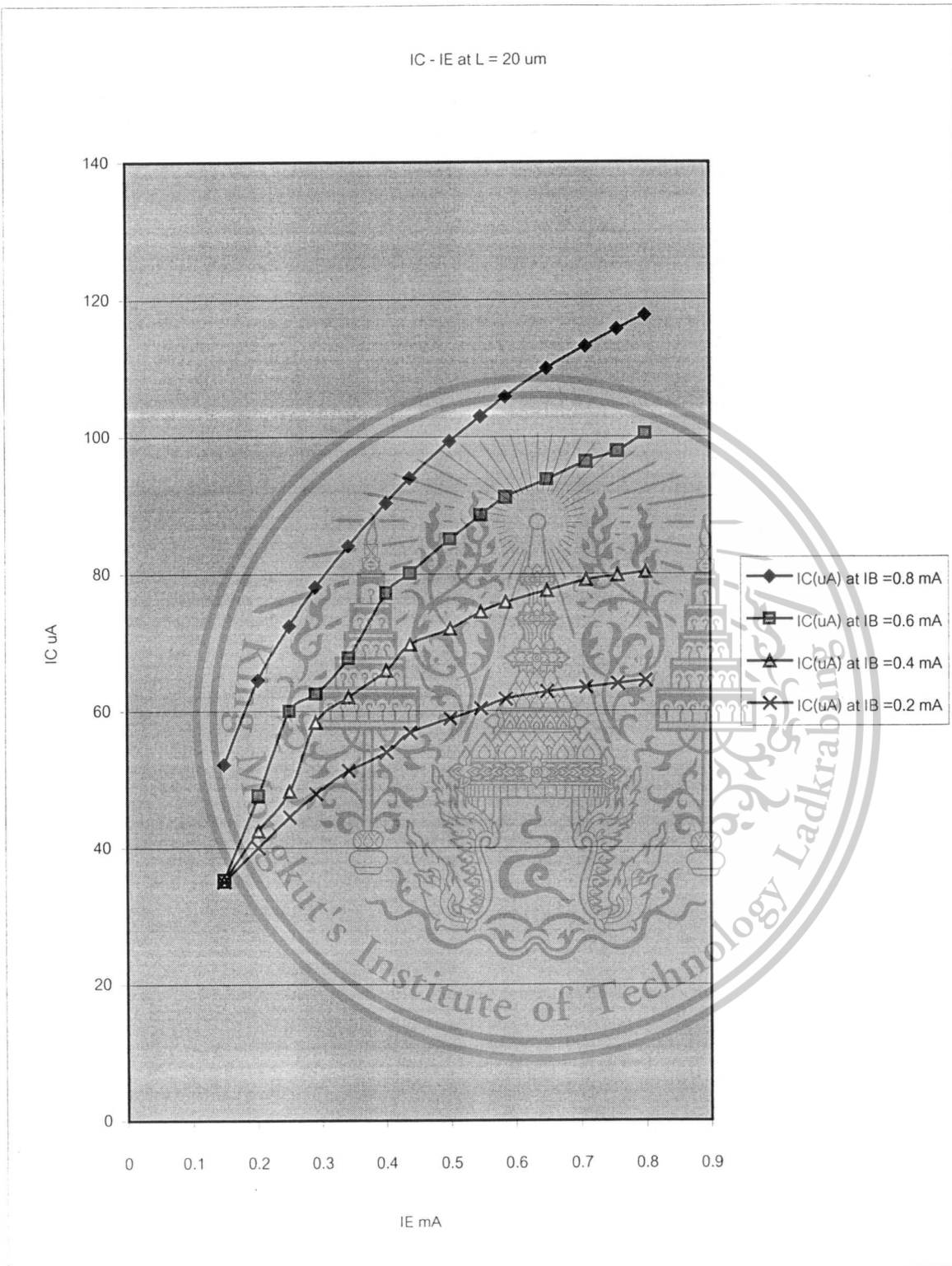
กับกระแสเบสที่มีความกว้างแบนด์เท่ากับ 10 ไมโครเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ **รูปที่ 6.17** กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ของกระแสคอลเลกเตอร์
 กับกระแสฐานรองที่ความกว้างเบสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

This material is for personal and non-commercial use only, not allowed for commercial use.

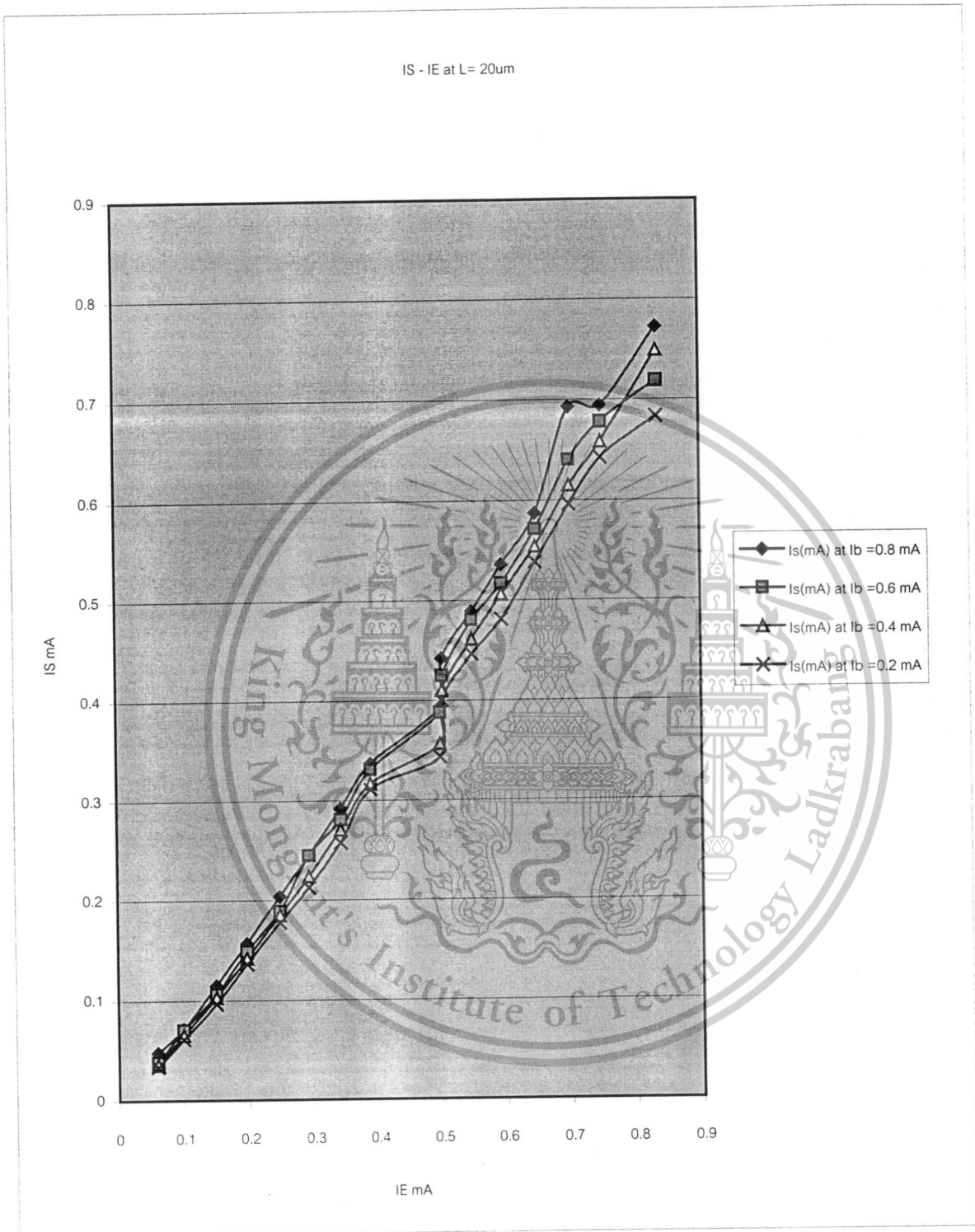
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 6.18 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลกเตอร์
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุตบแต่งสิ่งเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 6.19 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์

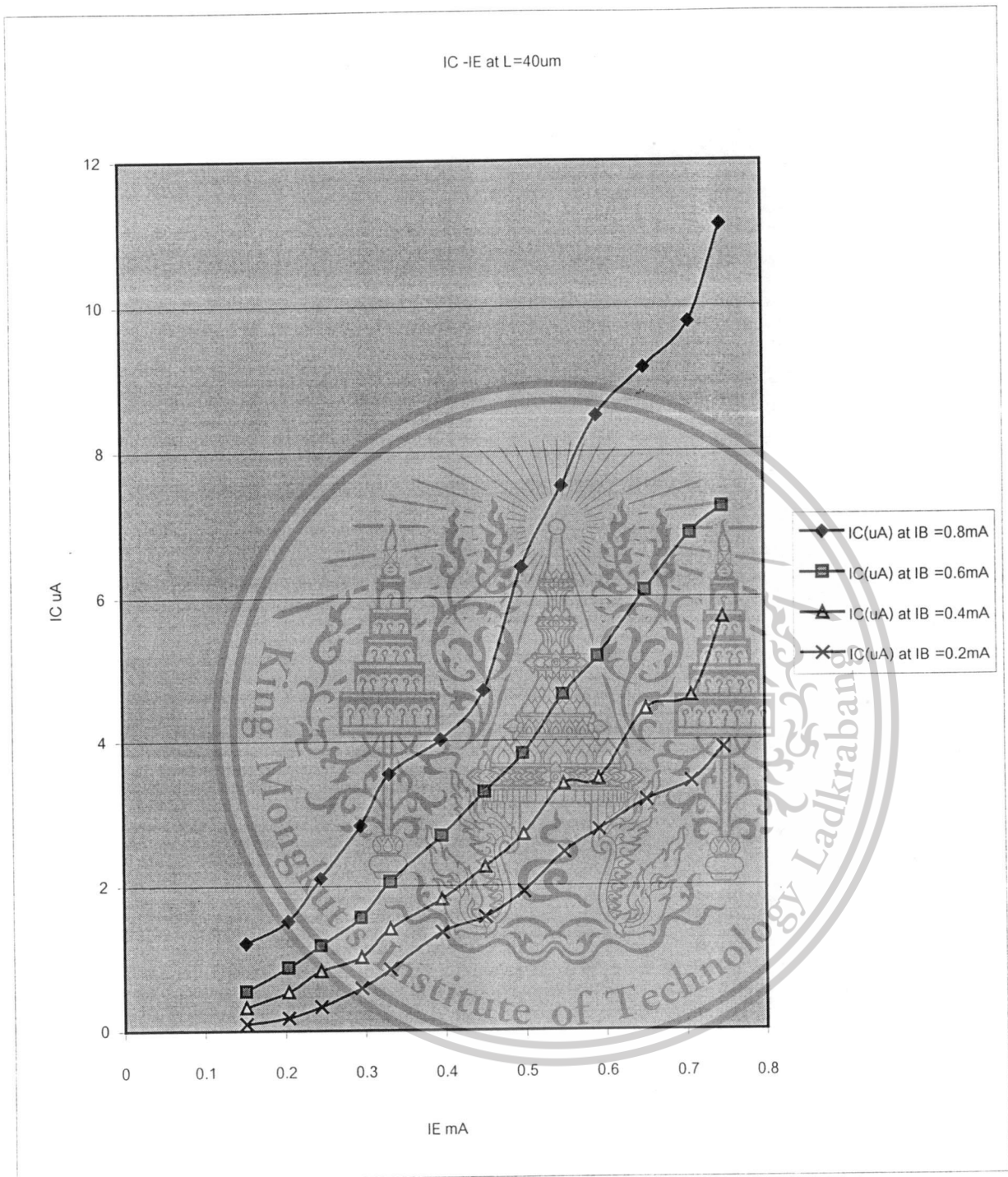
กับกระแสฐานรองที่ความกว้างเบส เท่ากับ 20 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

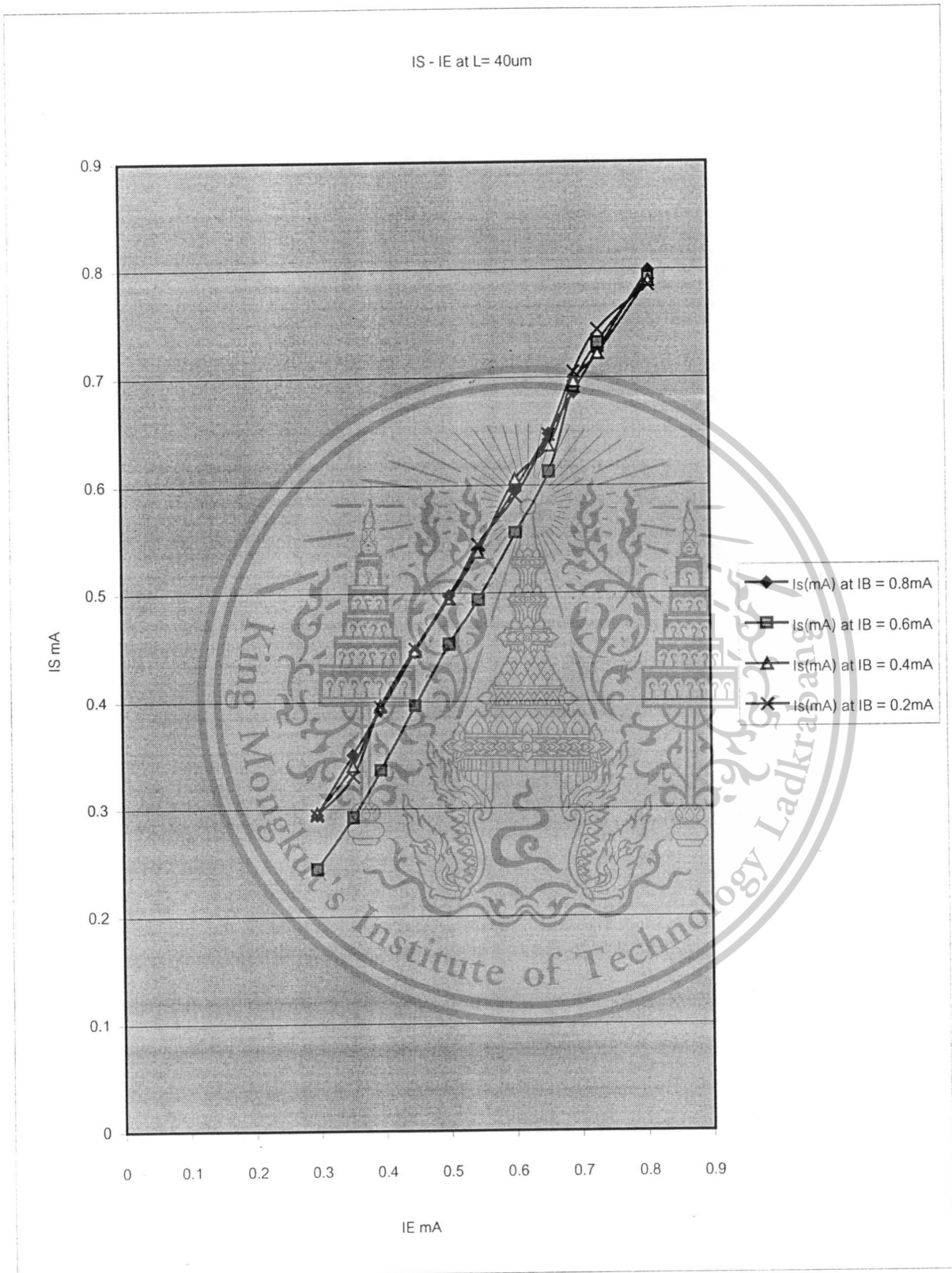


รูปที่ 6.20 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลคเตอร์
กับกระแสอิมิตเตอร์ที่ความกว้างเบส เท่ากับ 40 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



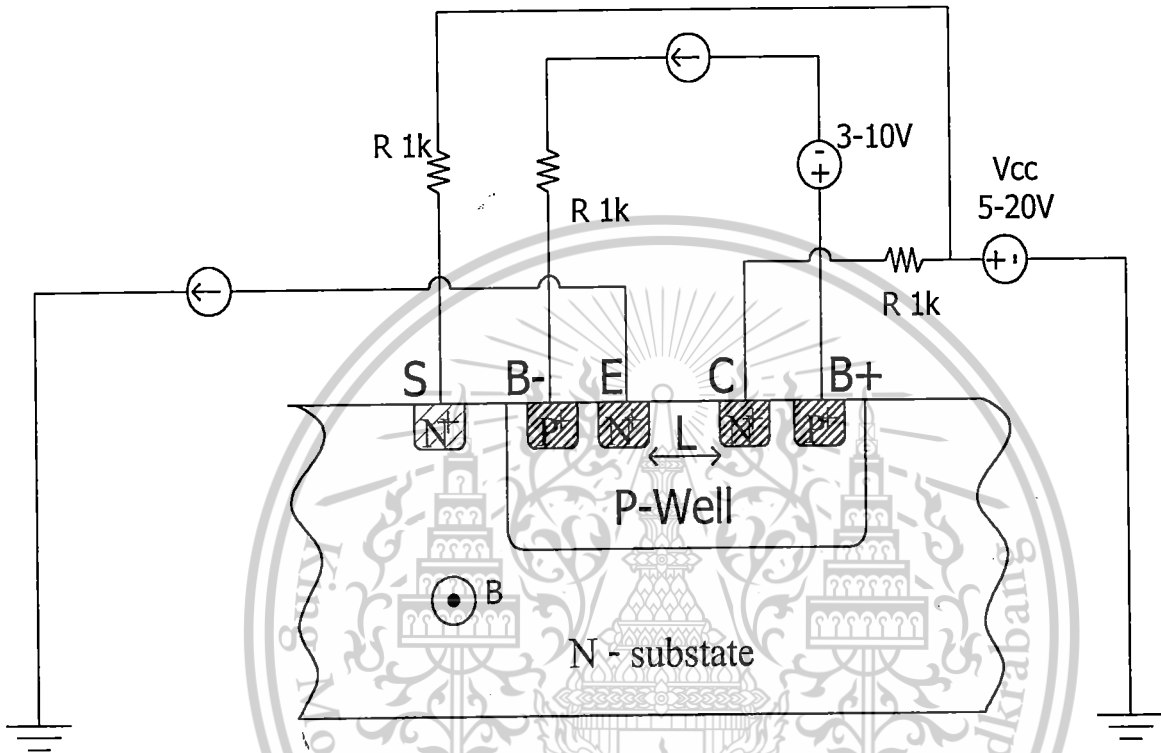
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าการ
รูปที่ 6.21 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบความสัมพันธ์ ของกระแส คอลเลกเตอร์
 กับกระแสฐานรองที่ความกว้างเบส เท่ากับ 40 ไมโครเมตร

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

6.4 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก และ ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

ซึ่งวิธีการวัดแสดงไว้ในภาคผนวก ข และ ค โดยค่าที่ได้จากการวัดแสดงไว้ในภาคผนวก ก



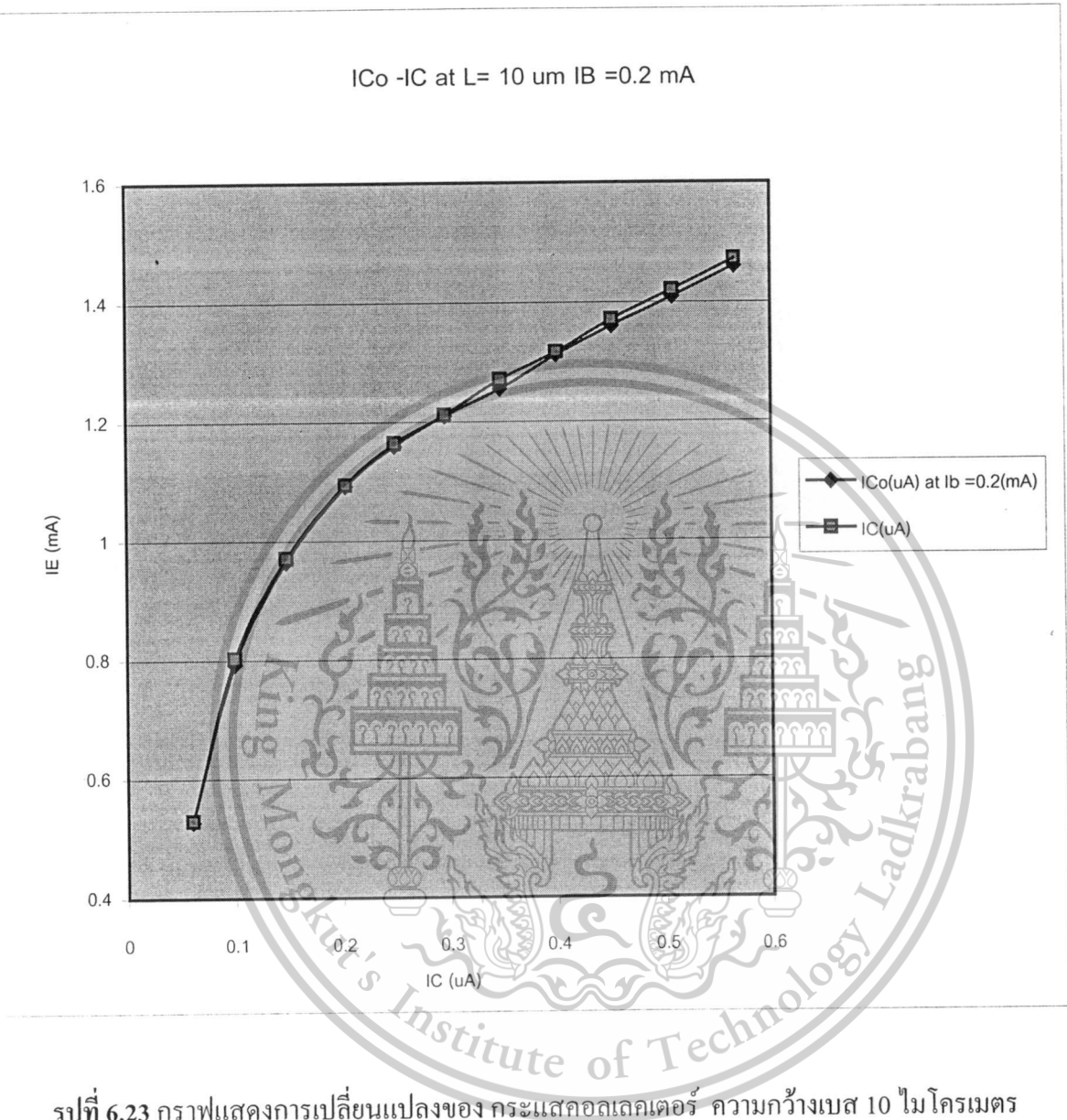
รูปที่ 6.22 แสดงการ ไบอัสพร้อมทั้งมีสนามแม่เหล็ก B ตัดผ่านระนาบในลักษณะขวาง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

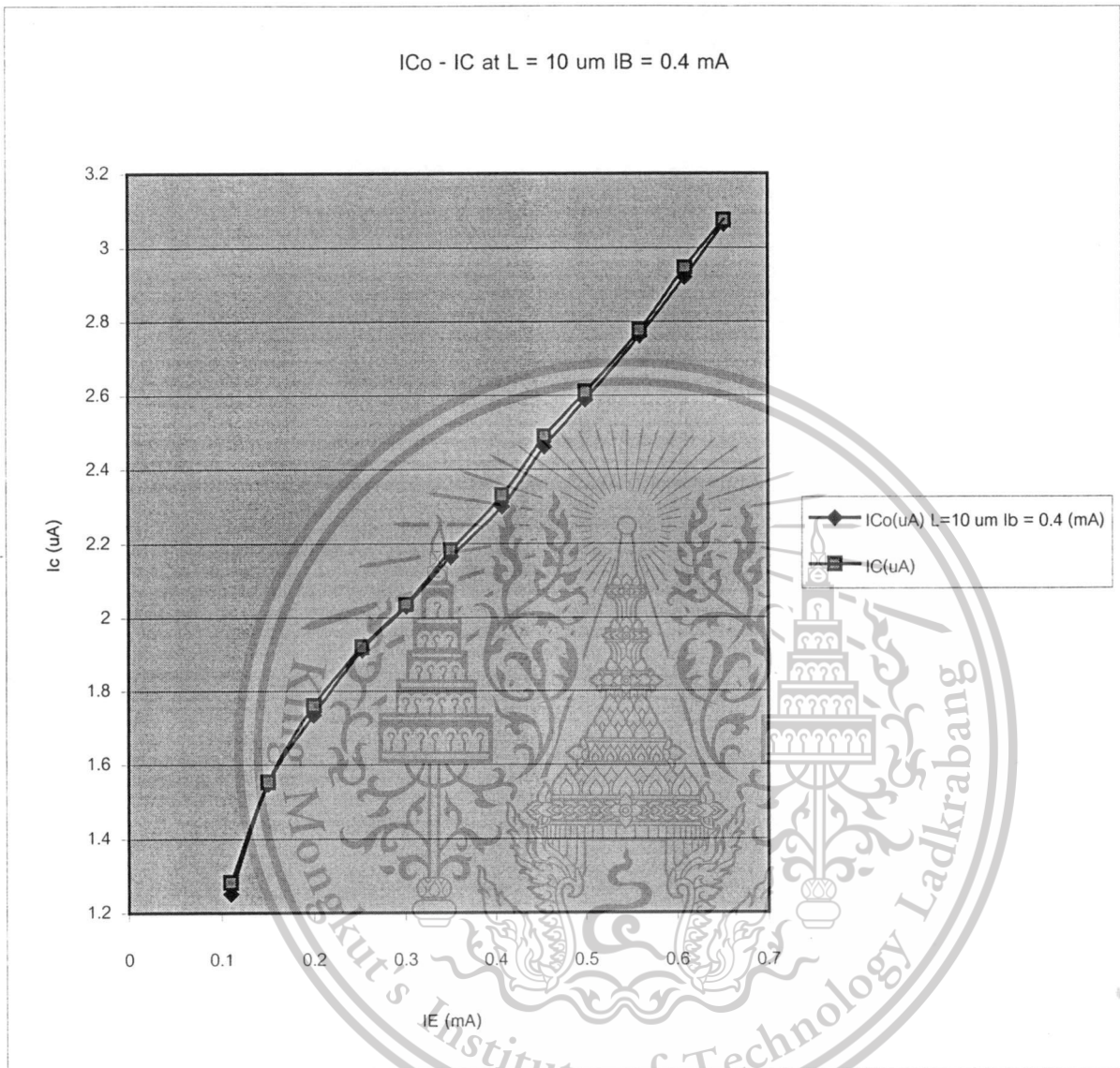


รูปที่ 6.23 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลกเตอร์ ความกว้างเบส 10 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

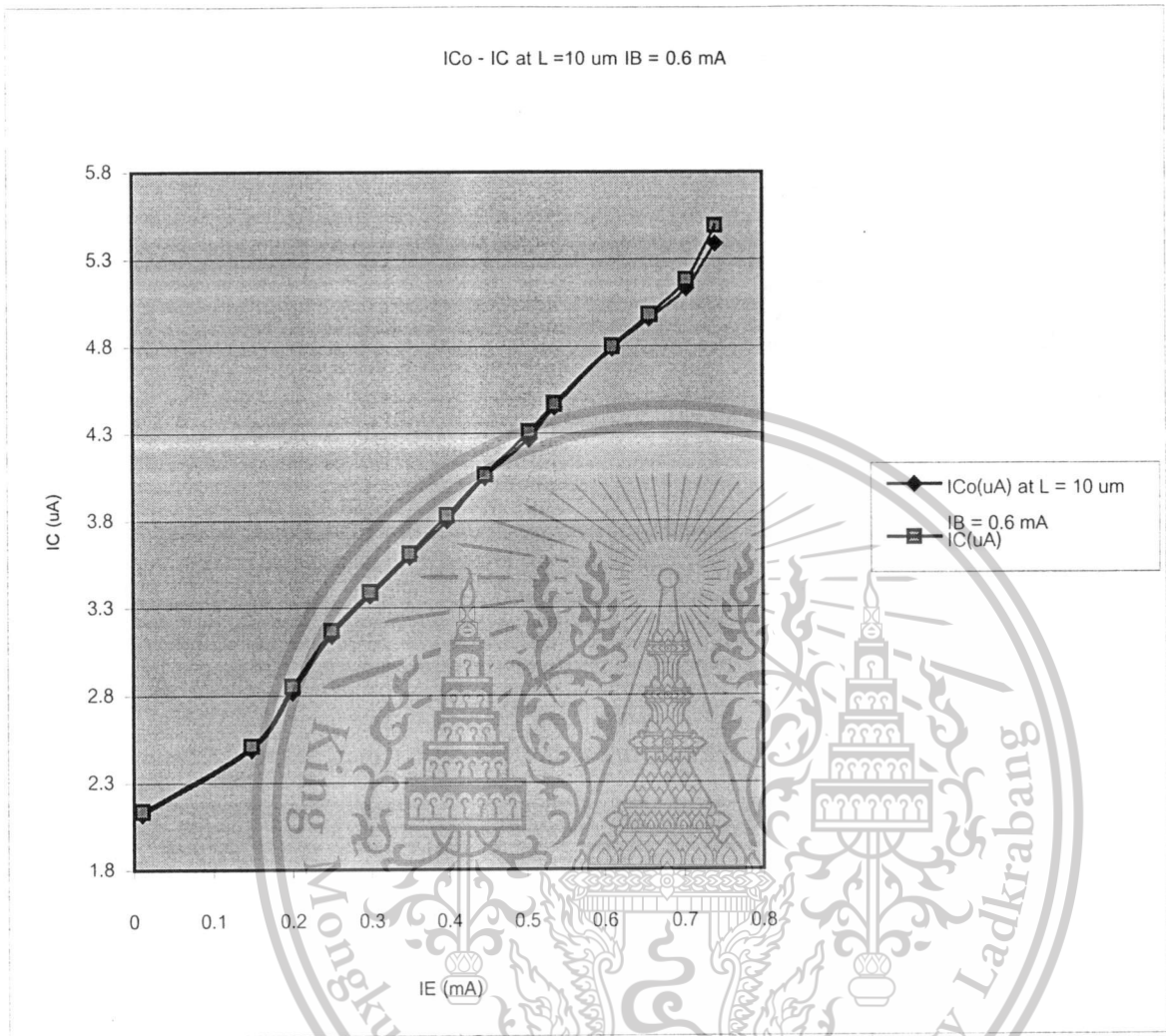


รูปที่ 6.24 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลกเตอร์ ความกว้างเบส 10 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

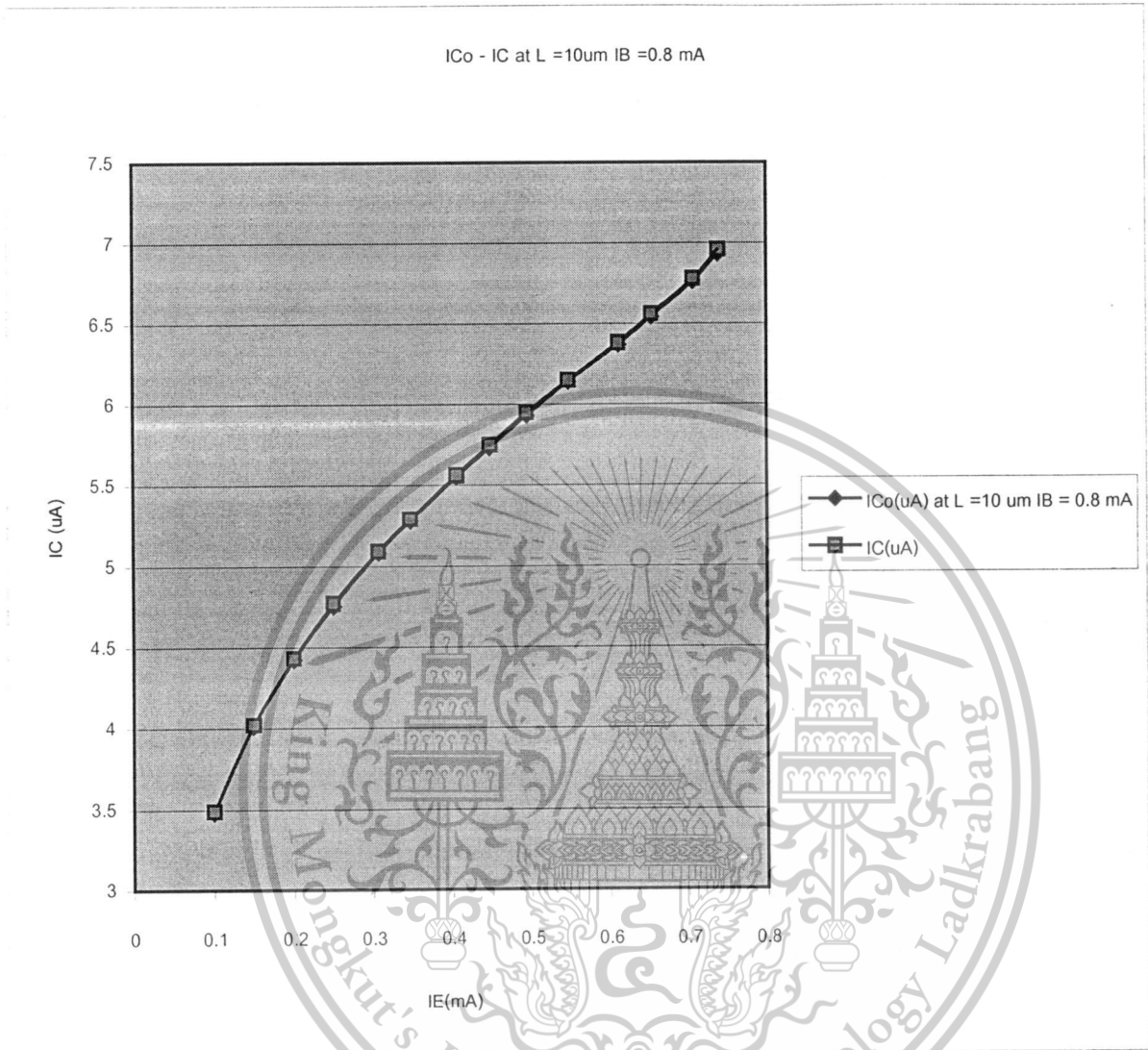


รูปที่ 6.25 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 10 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

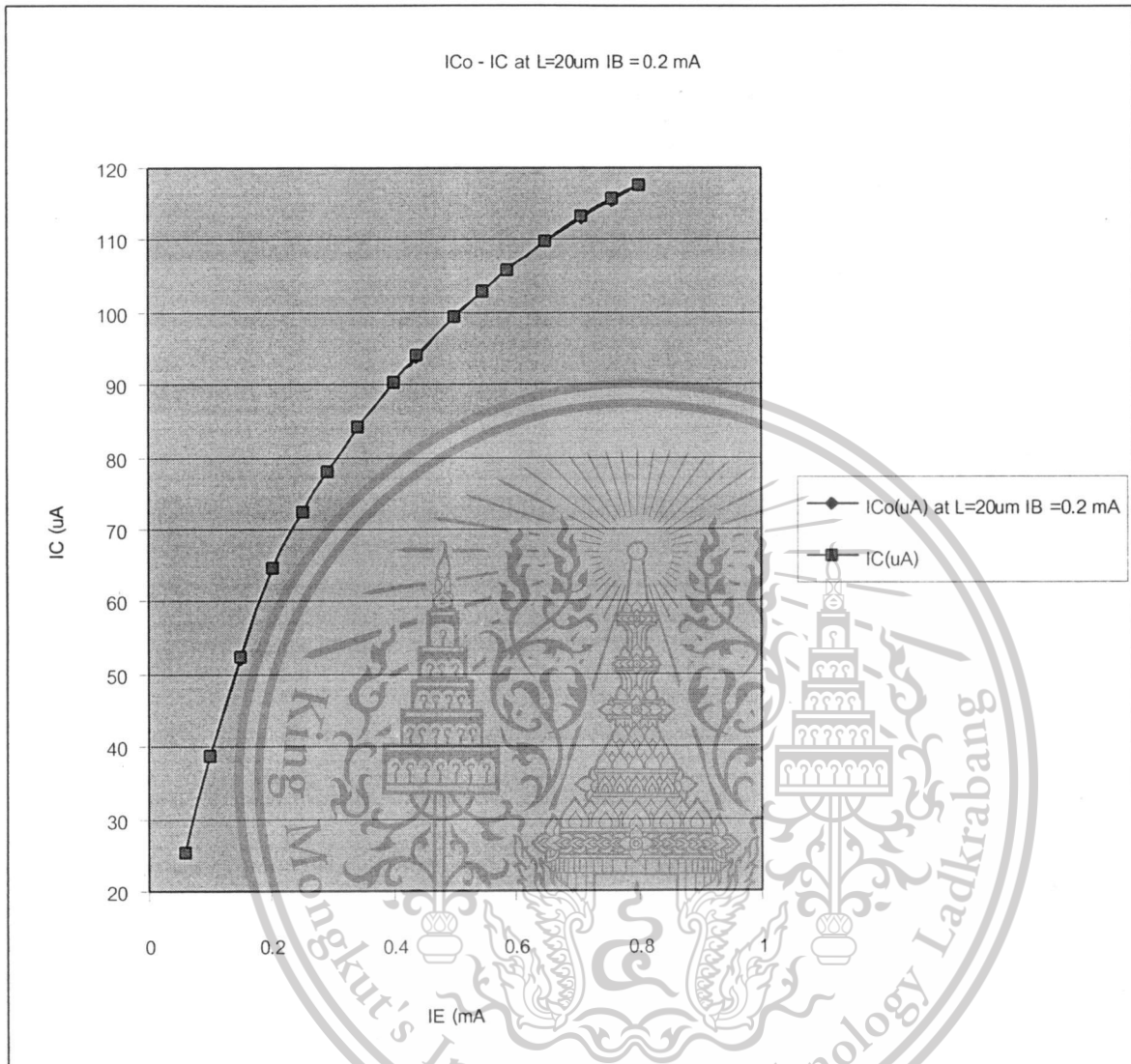


รูปที่ 6.26 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลกเตอร์ ความกว้างเบส 10ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

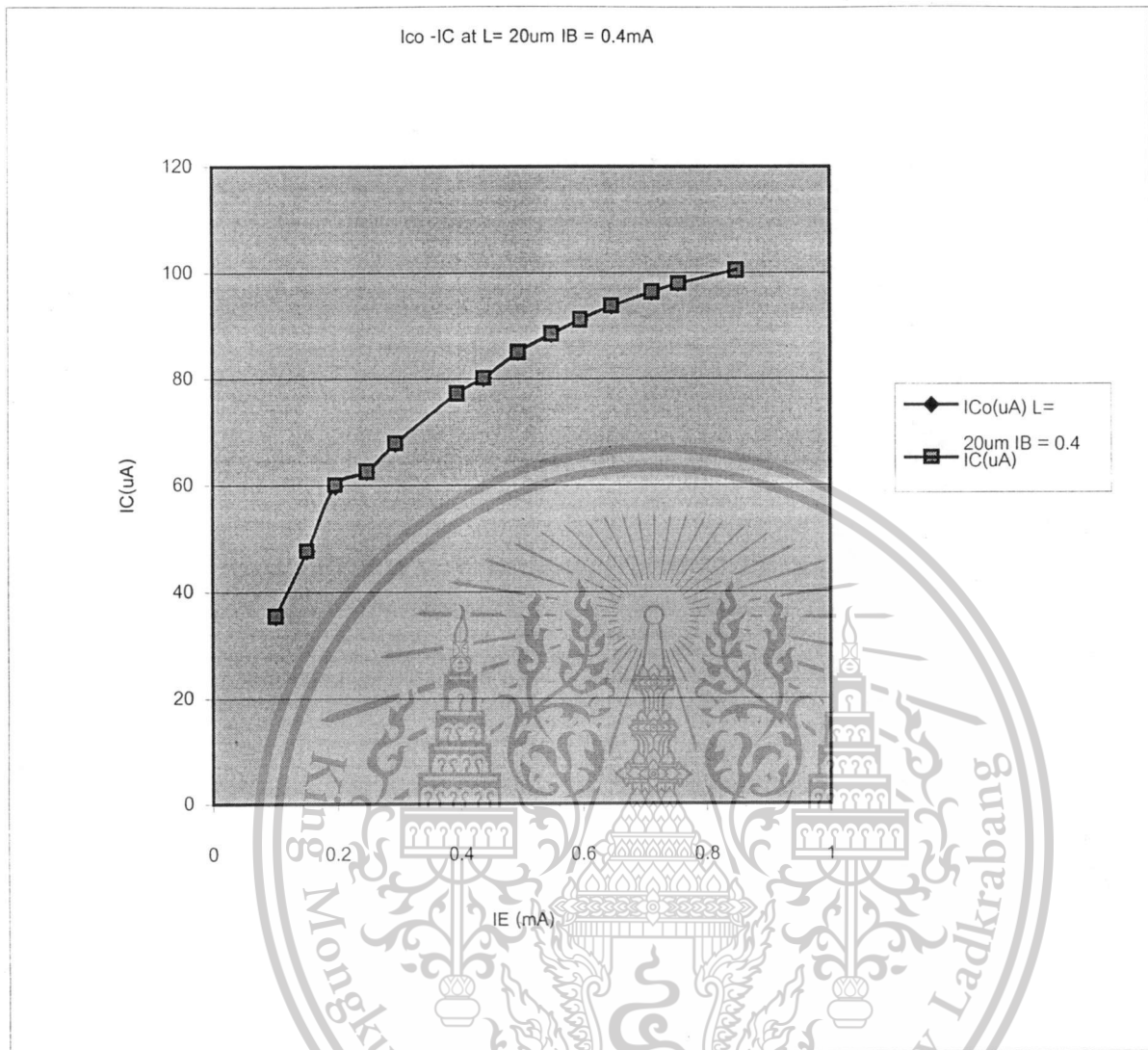


รูปที่ 6.27 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลกเตอร์ ความกว้างเบส 20 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

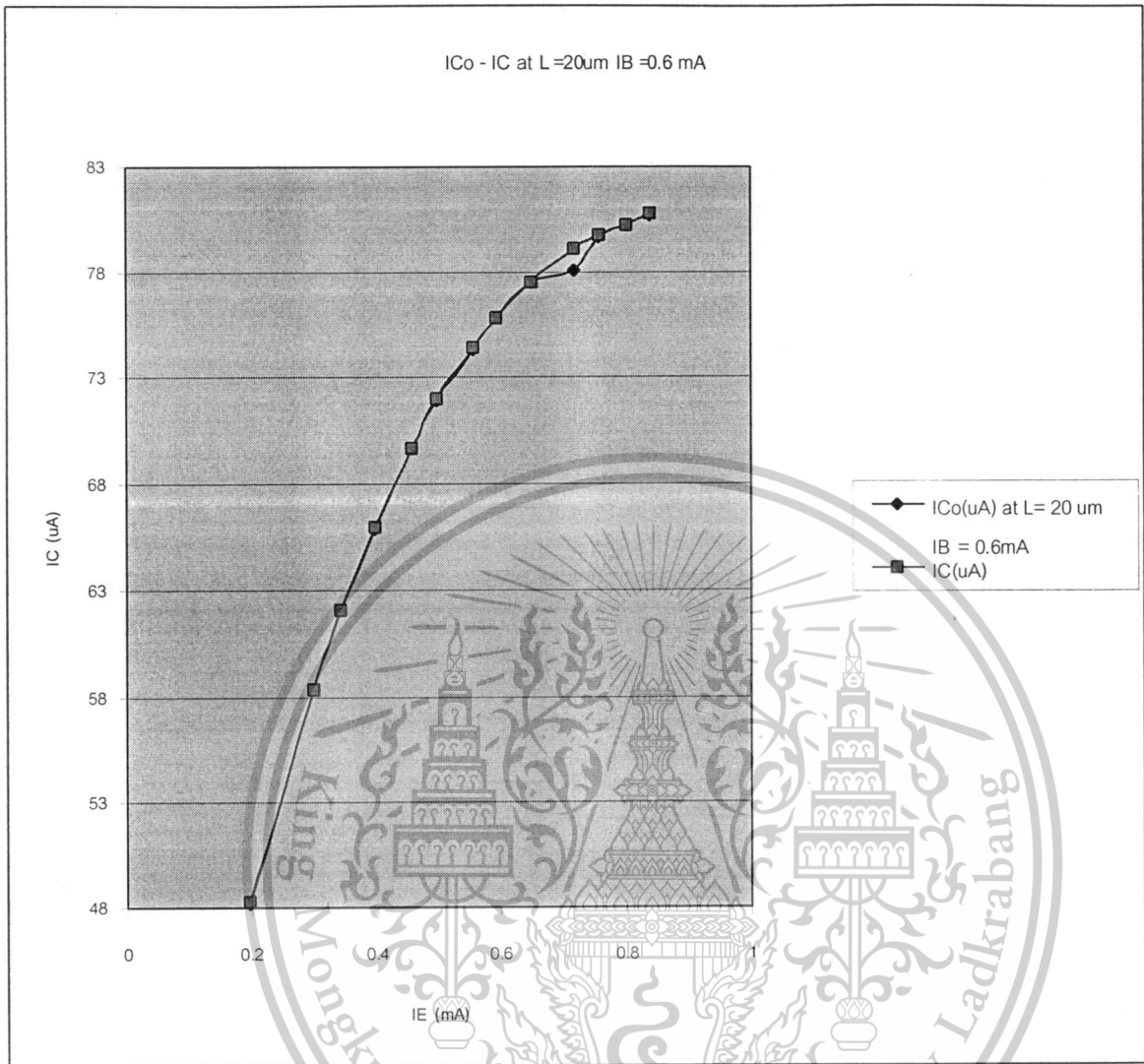


รูปที่ 6.28 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 20 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

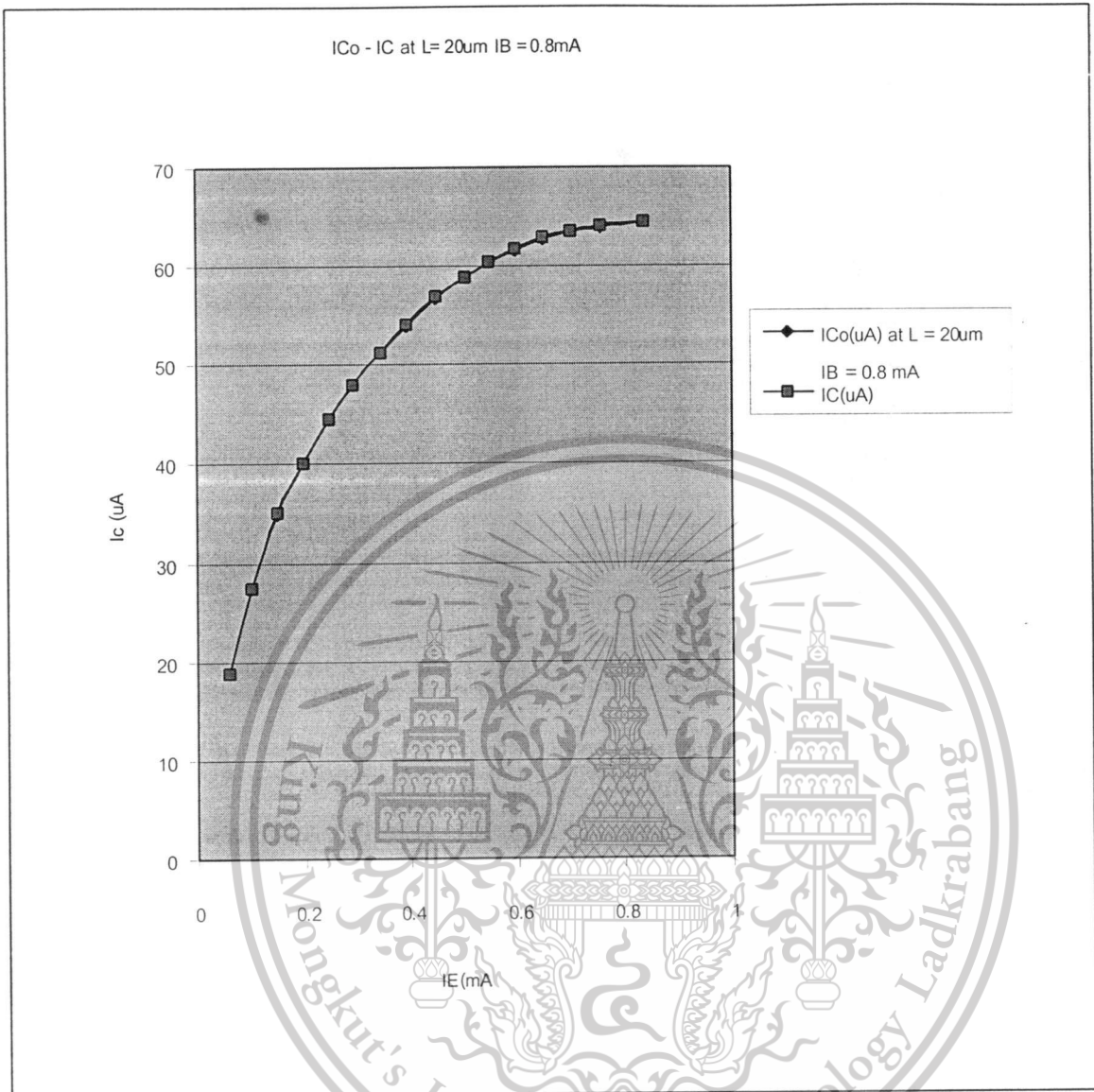


รูปที่ 6.29 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 20 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

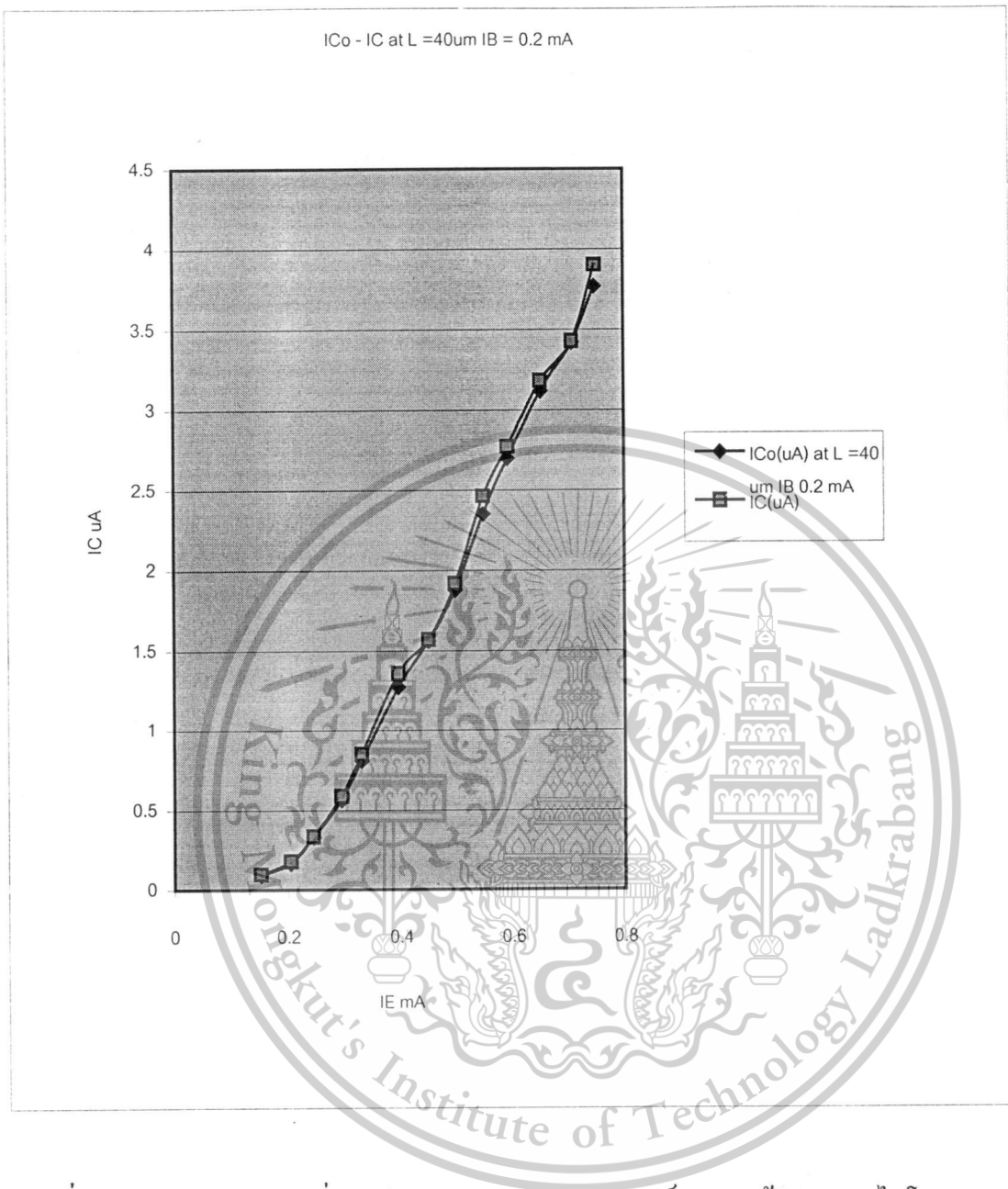


รูปที่ 6.30 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 20 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

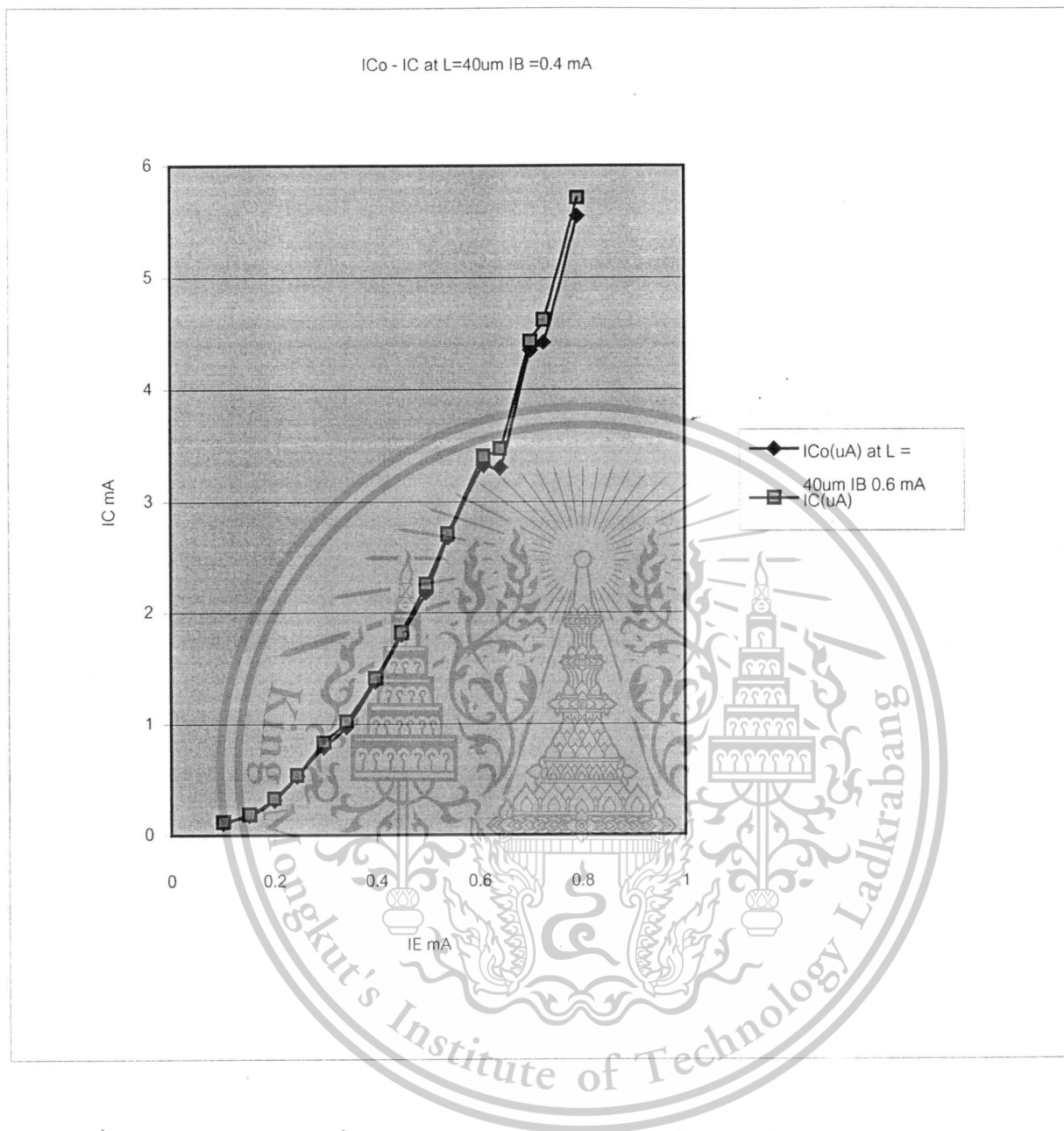


รูปที่ 6.31 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 40 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.2 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

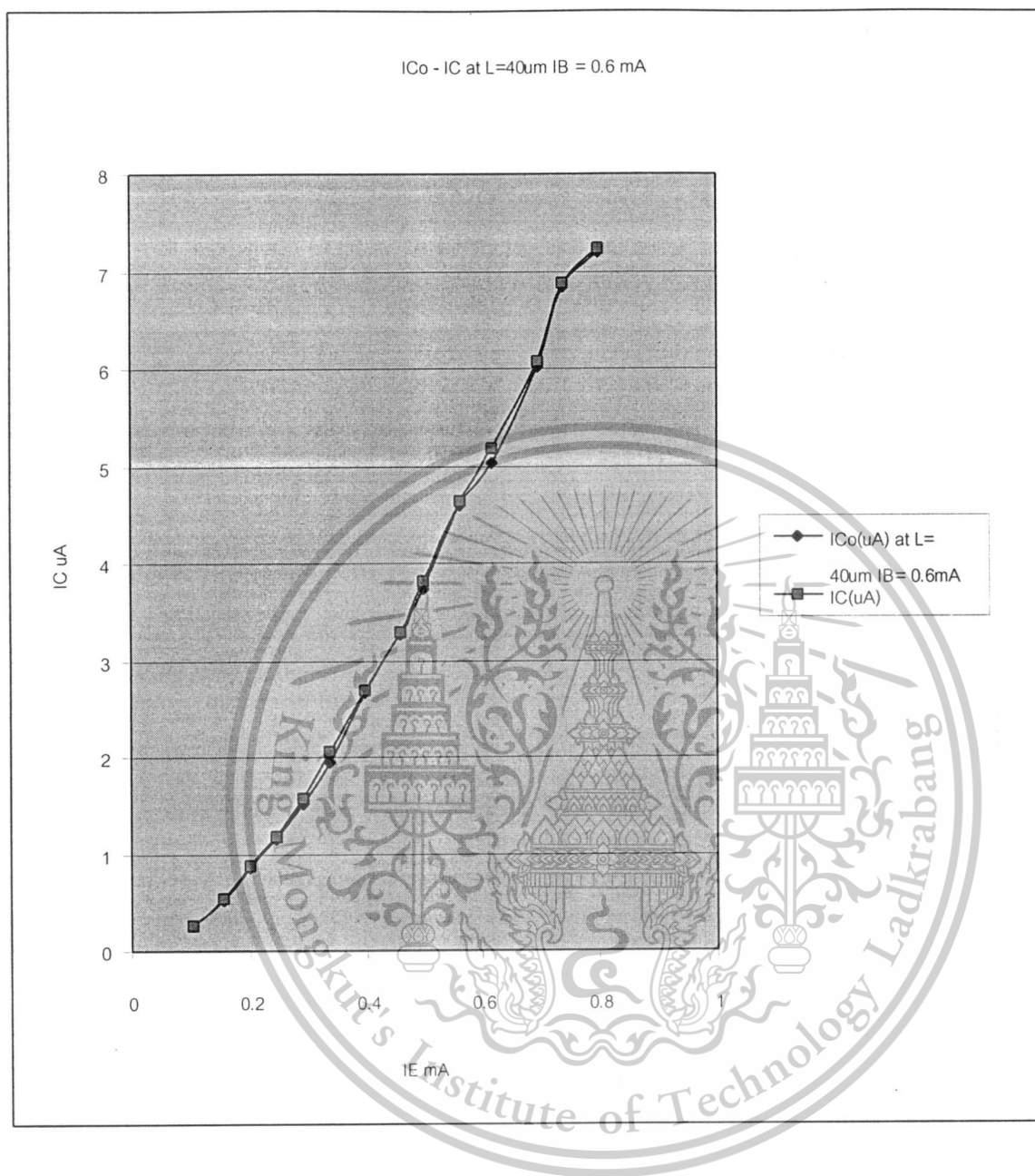


รูปที่ 6.32 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 40 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

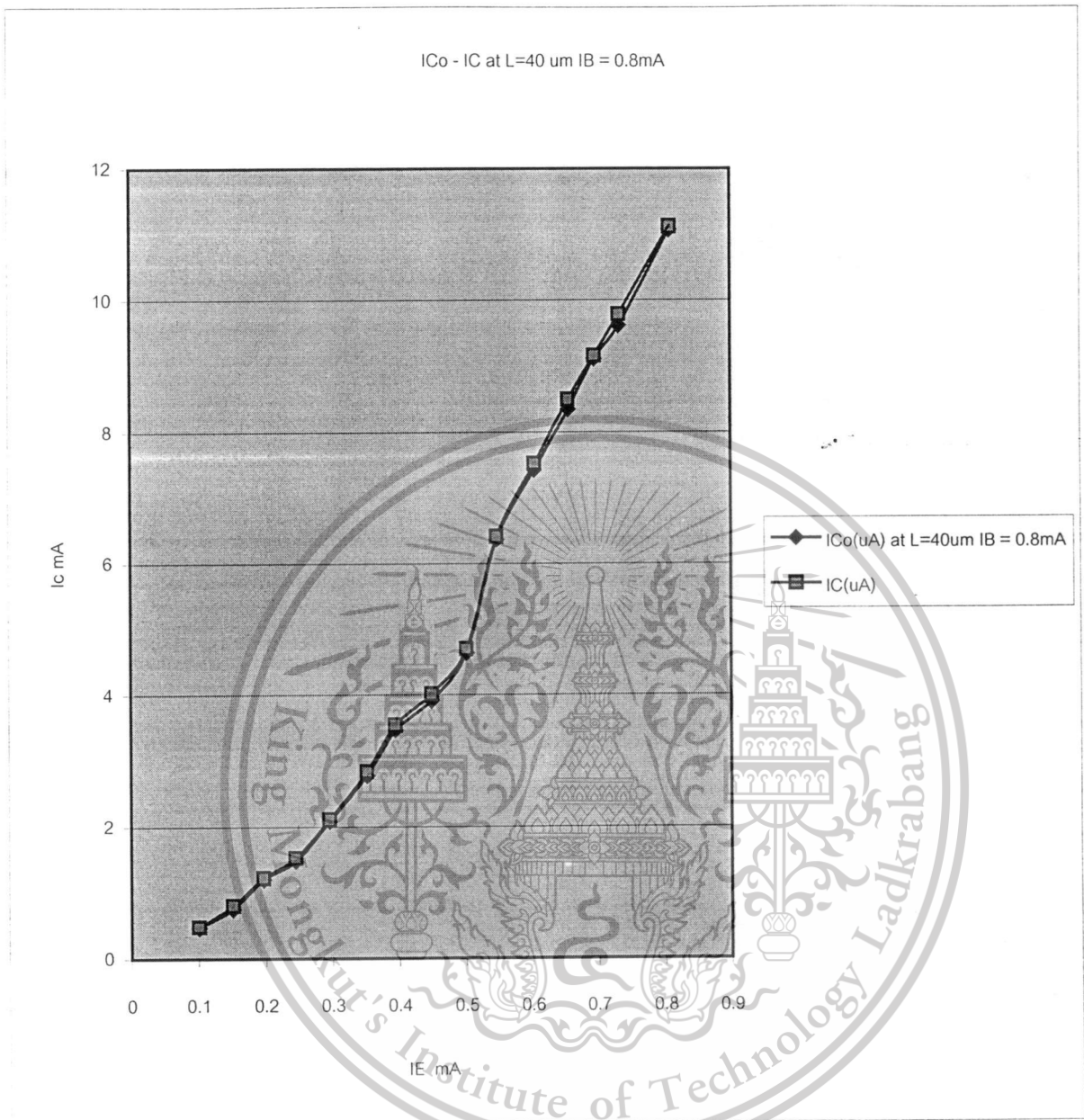


รูปที่ 6.33 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลกเตอร์ ความกว้างเบส 40 ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.6 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

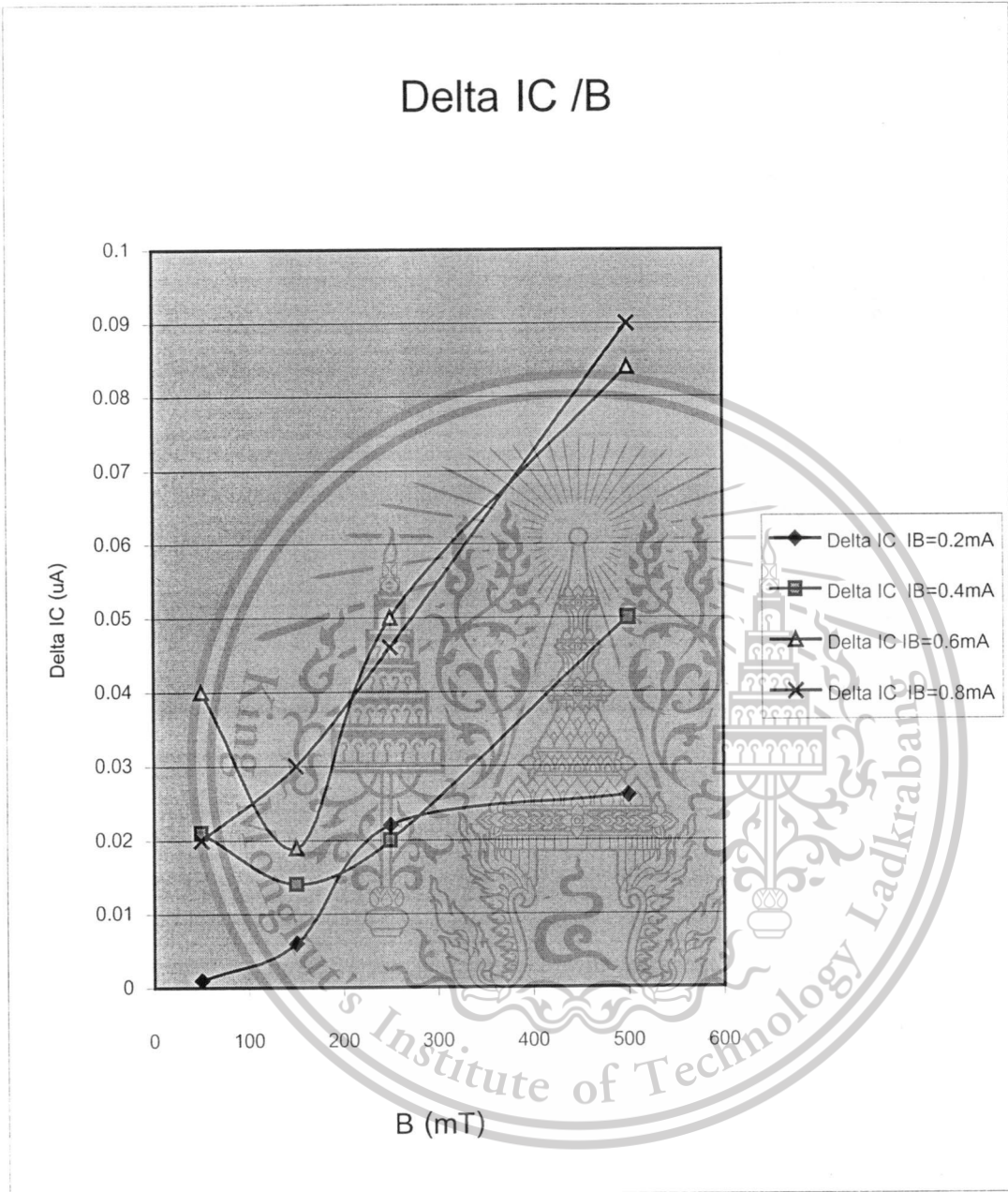
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 6.34 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ กระแสคอลเลคเตอร์ ความกว้างเบส 40ไมโครเมตร ที่กระแสเบส เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา

6.4.1 ผลของค่าความไวในการตรวจจับสัญญาณแม่เหล็ก

จากการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่นำผลของความไวที่แตกต่างระหว่าง I_{Co} กับ I_C นี้มาพล็อตกราฟของค่าเคลต้าโดยที่ $\Delta I_C = I_C - I_{Co}$ โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าของกระแส I_C ที่ต่างกันดังรูปที่ 6.35



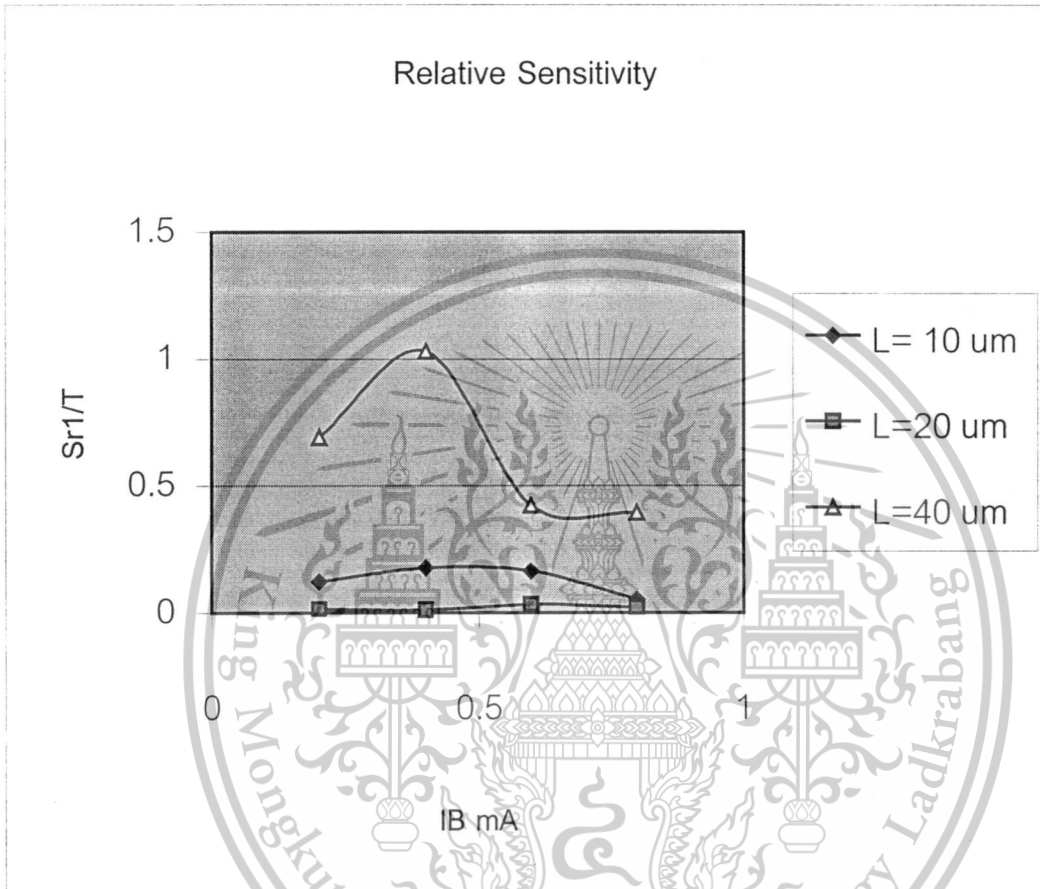
รูปที่ 6.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเลคเตอร์
ต่อ สัญญาณแม่เหล็ก

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

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากผลของค่ากระแส I_C ที่ต่างกันนั้นจะนำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาความสัมพันธ์ของความไวในการ เซนส์แม่เหล็กได้ดังสมการ $Sr = \frac{\Delta C}{IC_0} \times \frac{1}{B}$ แล้วพล็อตกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 6.36



รูปที่ 6.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความไวในการตรวจสอบสัญญาณแม่เหล็ก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 7

สรุป

จากการศึกษา ออกแบบ และวัดผลการทดสอบตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กสามารถที่จะสรุปได้ดังนี้

โครงสร้างของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบทรานซิสเตอร์แม่เหล็กแบบขวางสร้างได้จากเทคโนโลยีวงจรรวมแบบซีมอสบ่อแยกเป็นแบบชนิดพี โดยบ่อแยกสามารถสร้างได้จากกระบวนการแพร่มีความลึกประมาณ 4 ไมโครเมตร โครงสร้างมีลักษณะเป็นทรานซิสเตอร์ที่แตกต่างจากทรานซิสเตอร์ทั่วไปตรงที่มีขั้วเบสและคอลเลกเตอร์อย่างละสองขั้ว ขั้วเบสสองขั้วจะถูกไบอัสด้วยกระแสคงที่เพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าช่วยในการเคลื่อนที่ของพาหะจากอิมิตเตอร์ไปยังคอลเลกเตอร์ ขั้วคอลเลกเตอร์ขั้วหนึ่งเป็นขั้วปรกติที่สร้างภายในบ่อแยก ส่วนคอลเลกเตอร์ขั้วที่สองคือแผ่นฐานรองชนิดคอนชนิดเอ็น

การวัดคุณสมบัติรอยต่อต่างๆภายในโครงสร้างแสดงความเป็นรอยต่อพีเอ็นที่ดีในทุกรอยต่อ และโครงสร้างสองขั้วที่มีสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันขึ้นตรงกลางจะแสดงการขาดกันทางไฟฟ้า

การไบอัสเพื่อใช้งานกระทำโดยใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่แทนแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ สาเหตุเนื่องจากต้องการกำจัดผลกระทบจากสนามแม่เหล็กที่มีต่อการไบอัสหรือที่เรียกว่าการมอดดูเลตจากการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_C , I_E และ I_B ซึ่งเป็นไปตามปกติ

การทดสอบเมื่อนำทรานซิสเตอร์แม่เหล็กแบบขวางมีสนามแม่เหล็กให้แก่อุปกรณ์ในทิศทางตั้งฉากกับภาคตัดขวางของอุปกรณ์ในทิศทางตั้งฉากกระแสแนวอน จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงกระแสคอลเลกเตอร์ในระดับนาโนแอมแปร์ในช่วงความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 500 มิลลิเทสลา ความเป็นเชิงเส้นที่ดีจะเกิดเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่า 200 มิลลิเทสลา ค่าความไวของอุปกรณ์อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 1.1 T^{-1}

จากที่กล่าวมาทั้งหมดสรุปได้ว่าอุปกรณ์ที่สร้างได้สามารถแสดงผลตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กได้แต่ยังมีระดับการเปลี่ยนแปลงที่ยังต่ำอยู่ ซึ่งถ้าจะนำไปใช้งานตรวจจับปริมาณความเข้มสนามแม่เหล็กจะต้องทำให้ระดับการเปลี่ยนแปลงกระแสมากกว่านี้เพื่อที่จะอ่านค่าได้เที่ยงตรงและมีขนาดที่ชัดเจน โดยแนวทางหนึ่งอาจจะเปลี่ยนมิติของอุปกรณ์ หรืออาจจะปรับปรุงที่โครงสร้างซึ่งโครงสร้างที่ทำการศึกษานี้เป็นโครงสร้างที่ง่ายแต่ยังสามารถที่ทำได้ง่ายกว่านี้ได้

จากการศึกษาทั้งหมดเป็นการนำศักยภาพและเทคโนโลยีมาใช้ประโยชน์ในการศึกษาและสร้างองค์ความรู้ขึ้นภายในประเทศทำให้เกิดความรู้และทักษะในกระบวนการทั้งหมด นอกจากนี้จะนำไปขยายผล โดยเผยแพร่ในรูปแบบบทความวิจัยภายในประเทศ นำไปใช้ในการเรียนการสอนทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติการ นำไปพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กตามแนวทางที่ได้กล่าวไว้ โดยใช้เทคโนโลยีวงจรรวมต่อไป

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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(μ A)	IS(mA)	IE(mA)	IC(μ A)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(μ A)	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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)	Delta IC(uA)	Sr(1/T)
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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 6 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา
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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 7 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.6 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)
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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 10 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์
 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 50 มิลลิเทสลา
 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
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก				
IC(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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 16 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 150 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)		
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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 17 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 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)		
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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 18 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.4 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)		
3.837	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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก			Delta IC(uA)	Sr(1/T)
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)		
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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

ไม่มีสนามแม่เหล็ก			มีสนามแม่เหล็ก			Delta IC(uA)	Sr(1/T)
ICo(uA)	IS(mA)	IE(mA)	IC(uA)	IS(mA)	IE(mA)		
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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 22 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 มิลลิแอมป์
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 150 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)		
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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 23 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 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)		
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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 24 ค่าผลการวัดที่ กระแส IB เท่ากับ 0.8 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)		
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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ข

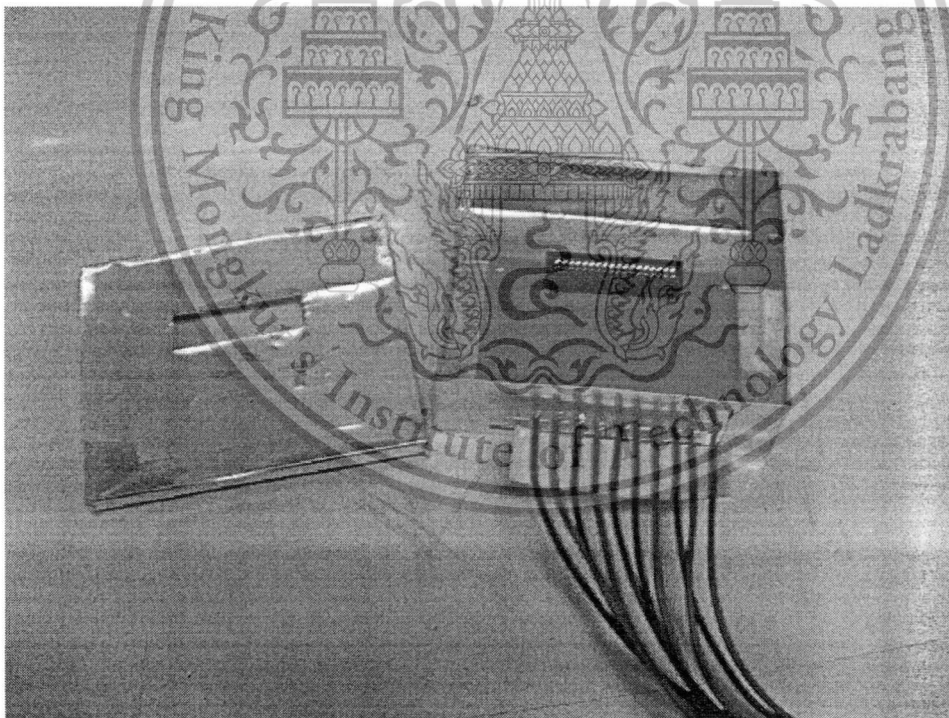
อุปกรณ์ประกอบการวัด

การเตรียมอุปกรณ์เพื่อทำการวัด

ในการทำการวัดและทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ให้กับทรานซิสเตอร์แม่เหล็กนั้นจำเป็นต้องมีการออกแบบอุปกรณ์ต่อร่วมเพื่อความสะดวกในการวัด และป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกเนื่องจากสัญญาณรบกวน ได้ทำการออกแบบดังนี้

กล่องสำหรับใช้ใส่ทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก

กล่องที่ใช้ทำการวัดมีลักษณะดังรูปที่ 1



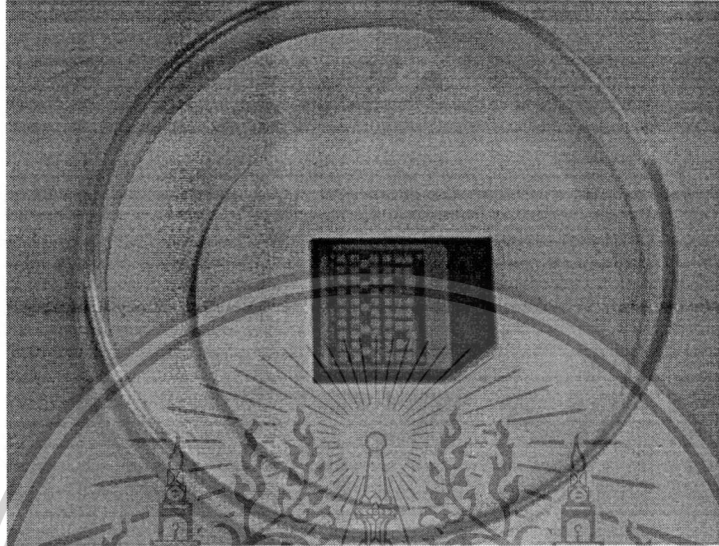
รูปที่ 1 แสดงภาพกล่องป้องกันสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

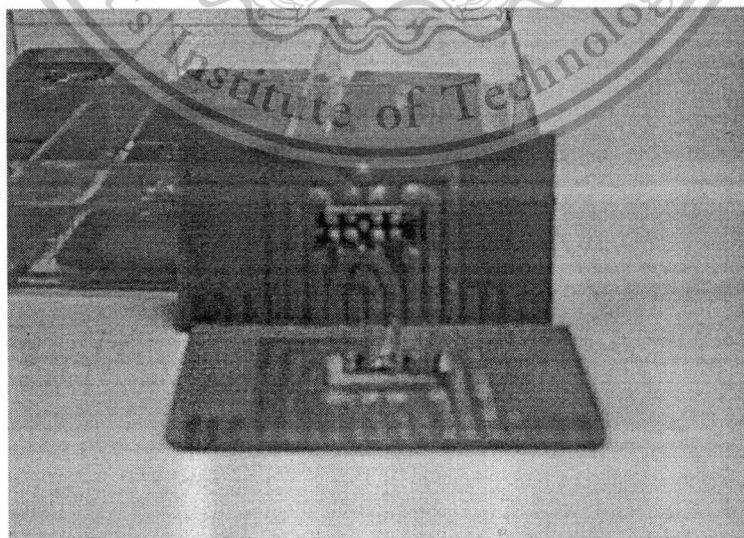
ซิลิกอนที่บรรจุอุปกรณ์อยู่เพื่อทำการวัดคุณสมบัติของรอยต่อ



รูปที่ 2 แสดงชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้ว

แผ่นปรีนซ์ที่ใช้สำหรับรองรับตัวทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก เพื่อต่อเข้ากับกล่อง

แผ่นวงจรที่ใช้ในการต่อขาของอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จแล้วมีลักษณะดังนี้



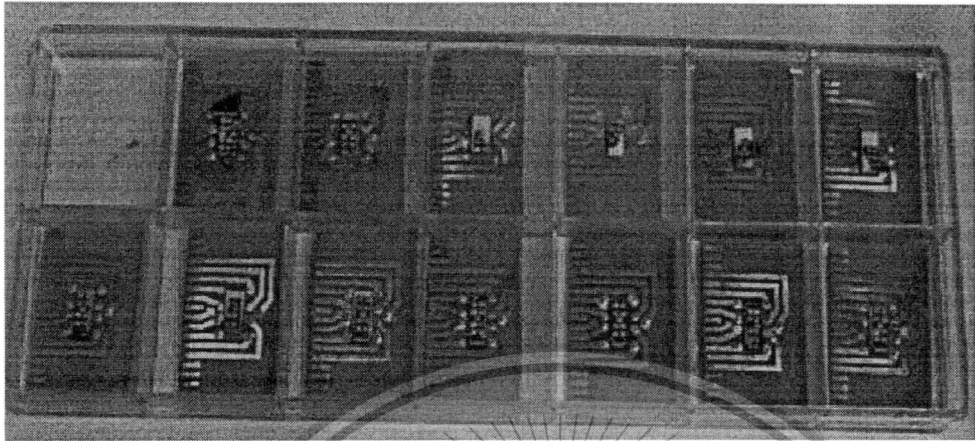
รูปที่ 3 แสดงแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับเพื่อความสะดวกในการต่อขากายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

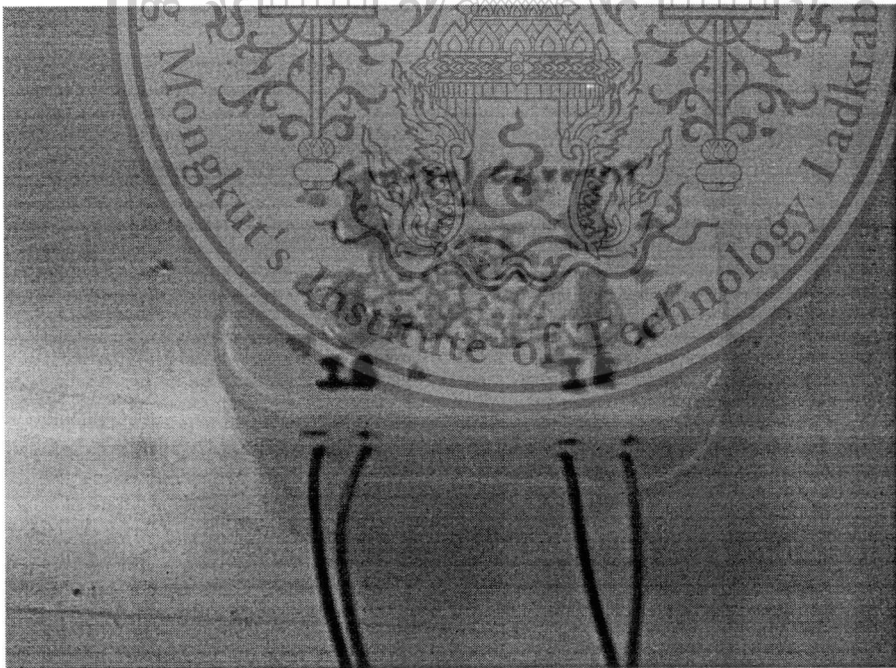
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4 แผงวงจรที่ใช้ต่อขา LMT

อุปกรณ์ควบคุมกระแสควบคุมกระแส



รูปที่ 5 แสดงภาพกล่องวงจรควบคุมกระแสคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

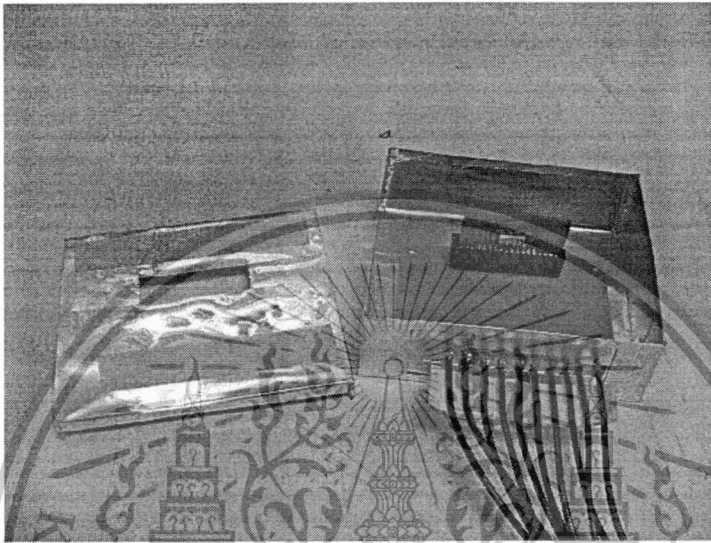
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

วิธีการทดลอง

ทำการต่อขาของทรานซิสเตอร์แม่เหล็กกับอุปกรณ์ต่อภายนอก

ในการทดลองที่ได้ใช้การต่อขาแบบตั้งกับแผ่นปริ้นซ์เพื่อนำไปเสียบต่อในกล่องซึ่งได้เลยเพื่อความสะดวก การต่อทำดังรูปนี้



รูปที่ 6 แสดงภาพกล่องต่อวงจร และป้องกันสัญญาณรบกวน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

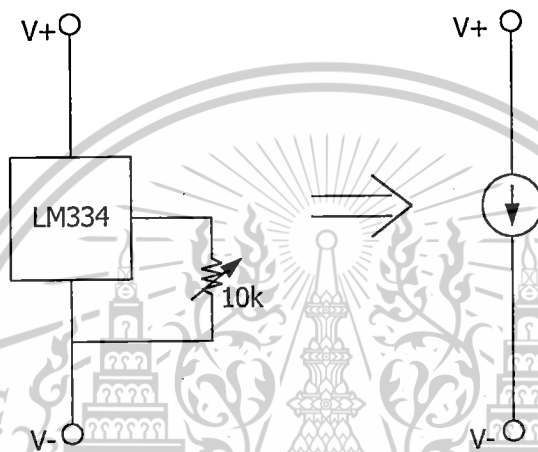
รูปที่ 7 แสดงการติดตั้งเพื่อการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

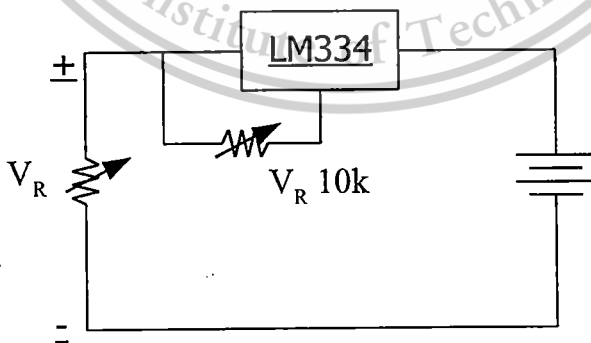
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ค
วิธีการและขั้นตอนการวัด

การออกแบบและทดสอบวงจรควบคุมกระแส



รูปที่ 8 แสดงวงจรสมมูลและสัญลักษณ์ IC ควบคุมกระแส

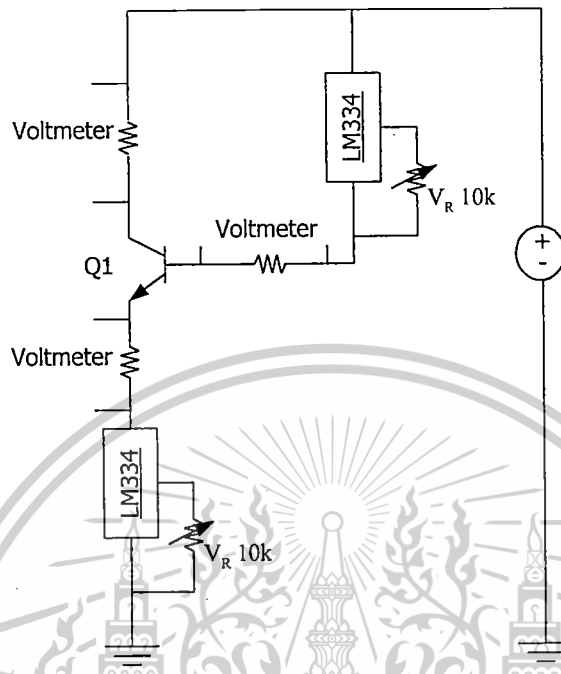


รูปที่ 9 แสดงวงจรทดสอบ IC ควบคุมกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



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

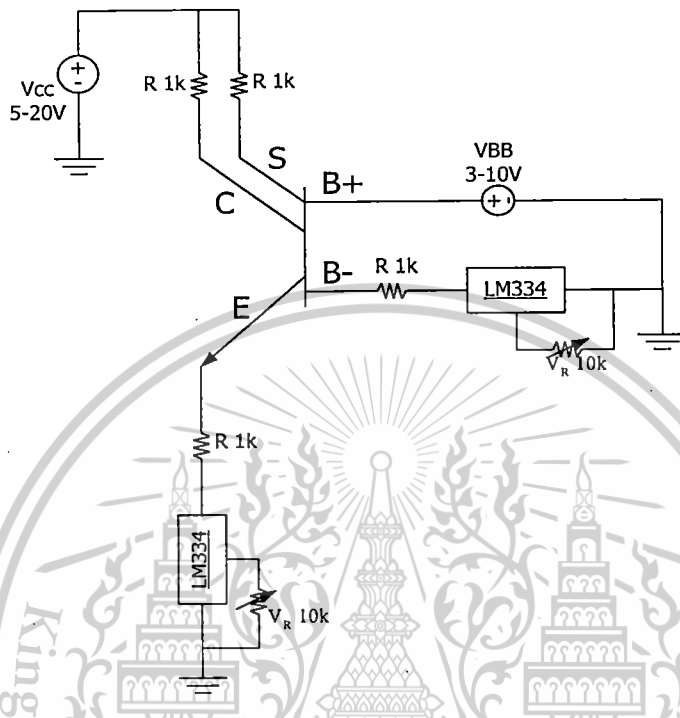
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

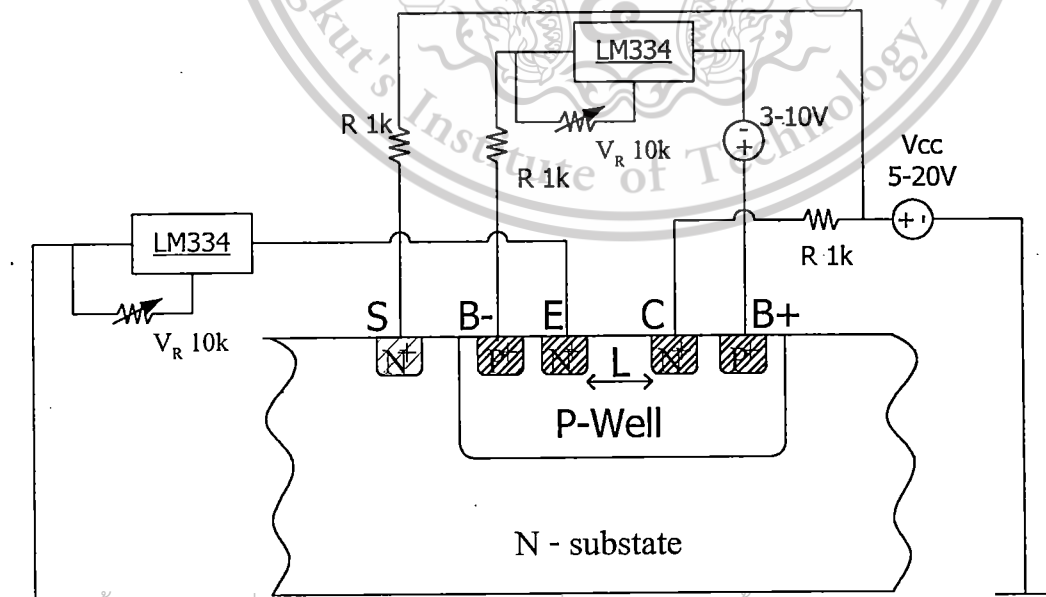
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การไบอัสไฟฟ้ากระแสตรง

ต่อวงจรตามรูปที่ 11 และ รูปที่ 12



รูปที่ 11 แสดงภาพสัญลักษณ์ต่อวงจรไบอัสให้กับเม็กนีโตทรานซิสเตอร์



รูปที่ 12 แสดงภาพการต่อวงจรไบอัสให้กับเม็กนีโตทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

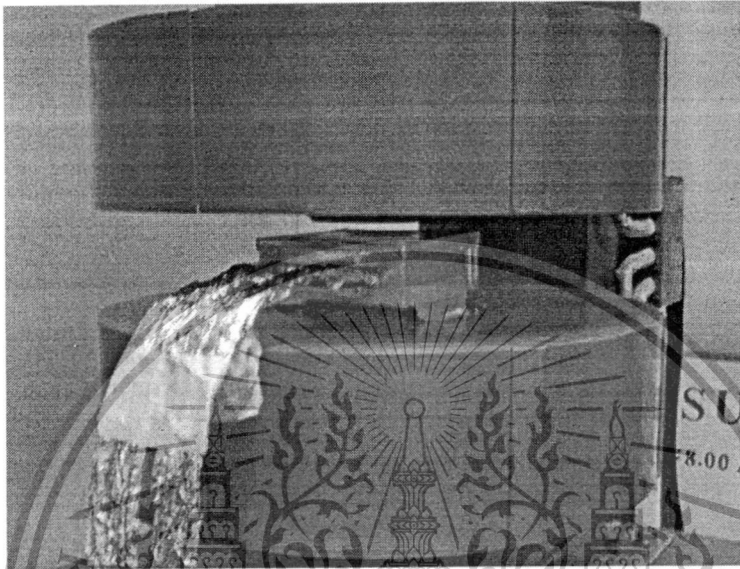
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

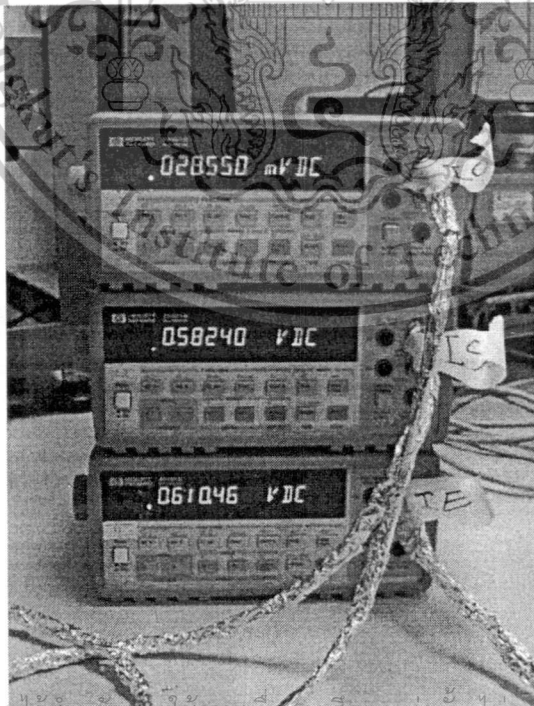
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทดสอบกับสนามแม่เหล็ก

นำเม็คนีโททรานซิสเตอร์ที่ไบอัสกระแสตรงแล้วไปทดสอบกับสนามแม่เหล็กกับเครื่องกำเนิดสัญญาณแม่เหล็ก



รูปที่ 13 แสดงภาพการติดตั้งกับเครื่องกำเนิดสัญญาณแม่เหล็ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 14 แสดงภาพมิเตอร์ที่แสดงผลการวัด

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ง

ค่าคงที่ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ

n_i : ความเข้มข้นอะตอมสารเจืออินทรินสิกที่ 300k (Intrinsic concentration)	$1.43 \times 10^{10} \text{ Atom/cm}^3$
k : ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's constant)	$8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
q : ประจุของอิเล็กตรอนหรือโฮล	$1.602 \times 10^{-19} \text{ Coulomb}$

แสดงวิธีการคำนวณต่างๆสำหรับรอยต่อพี-เอ็น

1. หาแรงดันภายในของรอยต่อพี-เอ็น

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

คำนวณหา N_A ที่ P-Well ได้

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

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

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

คำนวณหา N_A ที่ P⁺ ได้

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

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

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

คำนวณหา N_D ที่ N⁺ ได้

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

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

ดังนั้น คำนวณค่าแรงดันภายใน ได้คือ

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

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

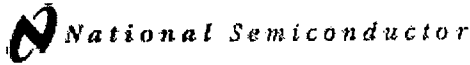
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ (1.43 x 10¹⁰)² ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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 $\pm 3\%$. 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 84mV at 25°C and is directly proportional to absolute temperature (°K). The simplest one external resistor connection, then, generates a current with $+0.33\%/^{\circ}\text{C}$ 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,

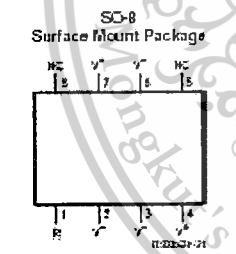
LED driver, and temperature sensing. The LM234-3 and LM234-8 are specified as true temperature sensors with guaranteed initial accuracy of $\pm 3^{\circ}\text{C}$ and $\pm 6^{\circ}\text{C}$, respectively. These devices are ideal in remote sense applications because series resistance in long wire runs 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-48 hermetic, TO-92 and SO-8 plastic packages.

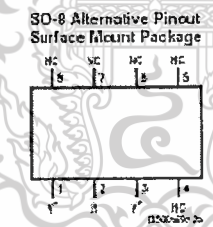
Features

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

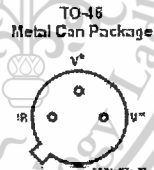
Connection Diagrams



Order Number LM334M or LM334MX
See NS Package Number M08A



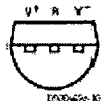
Order Number LM334SM or LM334SMX
See NS Package Number M08A



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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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
Soldering Information			
V ⁺ to V ⁻ Forward Voltage		TO-92 Package (10 sec.)	260°C
LM134/LM234/LM334		TO-46 Package (10 sec.)	300°C
LM234-3/LM234-6		SO Package	
V ⁺ to V ⁻ Reverse Voltage		Vapor Phase (60 sec.)	215°C
20V		Infrared (15 sec.)	220°C
R Pin to V ⁻ Voltage		See AN-460 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" (Appendix D) for other methods of soldering surface mount devices.	
Set Current			
10 mA			
Power Dissipation			
400 mW			
ESD Susceptibility (Note 6)			
2000V			
Operating Temperature Range (Note 5)			
LM134			-55°C to +125°C

Electrical Characteristics (Note 2)		LM134/LM234			LM334		Units	
Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Min	Max		
Set Current Error, V ⁺ =2.5V. (Note 3)	10µA ≤ I _{SET} ≤ 1mA			3		6	%	
	1mA < I _{SET} ≤ 5mA			6		6	%	
	2µA ≤ I _{SET} < 10µA			8		12	%	
Ratio of Set Current to Bias Current	100µA ≤ I _{SET} ≤ 1mA	14	18	23	14	18	28	
	1mA ≤ I _{SET} ≤ 5mA		14		14			
	2µA ≤ I _{SET} < 100µA		18	23	18	28		
Minimum Operating Voltage	2µA ≤ I _{SET} ≤ 100µA		0.8			0.8	V	
	100µA < I _{SET} ≤ 1mA		0.9			0.9	V	
	1mA							
	1mA < I _{SET} ≤ 5mA		1.0			1.0	V	
Average Change in Set Current with Input Voltage	2µA ≤ I _{SET} ≤ 1mA							
	1.5 ≤ V ⁺ ≤ 5V		0.02	0.05			%/V	
	5V ≤ V ⁺ ≤ 40V		0.01	0.03		0.01	0.05	%/V
	1mA < I _{SET} ≤ 5mA							
	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 intended, but do not guarantee specific performance limits.

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/R_{SET} (R_{SET} in Ω). Set current error is expressed as a percent deviation from this amount. I_{SET} increases at 0.333%/°C at T_J = 25°C (227 µW/°C).

Note 4: I_{SET} is directly proportional to absolute temperature (°K). I_{SET} at any temperature can be estimated from: I_{SET} = I_{SET}(T₁) where I_{SET} is I_{SET} measured at T₁ (°K).

Note 5: For elevated temperature operation, T_J must be:

LM134	150°C
LM234	125°C
LM334	100°C

Thermal Resistance	TO-92	TO-46	SO-9
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)	NA	32°C/W	86°C/W

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Electrical Characteristics (Note 2)								
Parameter	Conditions	LM234-3			LM234-B			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	28	14	18	28	
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	$100\mu A \leq I_{SET} \leq 1mA$	0.98T	T	1.02T	0.97T	T	1.03T	%
Effective Shunt Capacitance			15			15		pF

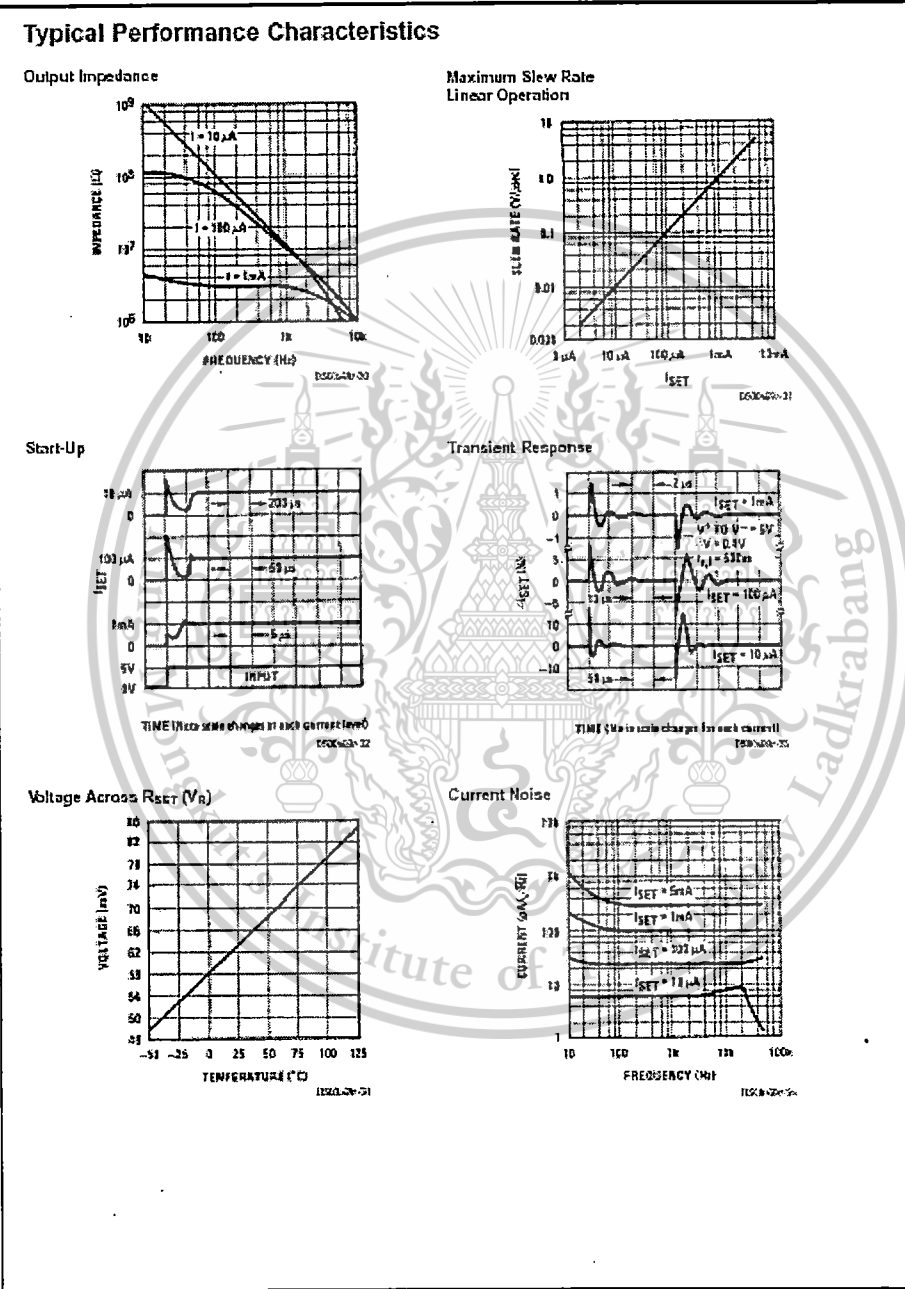
LM234/LM234/LM334

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

LM134/LM234/LM334



www.national.com

4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

LM134/LM234/LM334

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 0.75Ω contact resistance to reduce output current by 1% at the 1 mA 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 0°K, independent of R_{SET} or any initial inaccuracy.

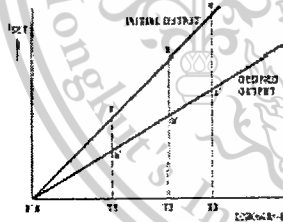


FIGURE 2. Gain Adjustment

This property of the LM134 is illustrated in the accompanying graph. Line abc is the sensor 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).

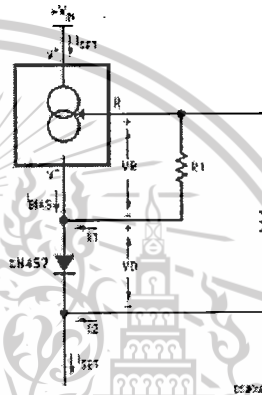


FIGURE 3. Zero Tempco Current Source

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

$$I_{SET} = I_1 + I_2 + I_{IAS} \approx I_1 + I_2$$

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

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_{IAS} 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).

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

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

$$\approx \frac{227 \mu V/^\circ C}{R_1} + \frac{227 \mu V/^\circ C - 2.5 mV/^\circ C}{R_2}$$

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

$$R_2 \approx \frac{2.5 mV/^\circ C - 227 \mu V/^\circ C}{227 \mu V/^\circ C} \approx 10.0$$

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_{IAS}), and $R_2/R_1 = 10$ (from the previous calculations).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Application Hints (Continued)

$$\begin{aligned}
 I_{SET} &= I_1 + I_2 + I_{DAS} \\
 &= \frac{V_{R1}}{R_1} + \frac{V_{R2} + V_D}{R_2} \\
 &= \frac{67.7 \text{ mV}}{R_1} + \frac{67.7 \text{ mV} + 0.6 \text{ V}}{10.0 R_1} \\
 I_{SET} &= \frac{0.134 \text{ V}}{R_1}
 \end{aligned}$$

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 :

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

The values of R_1 and R_2 can be changed to standard 1% resistor values ($R_1 = 133 \Omega$ and $R_2 = 13.3 \text{ k}\Omega$) with less than a 0.75% error.

If the forward voltage drop of the diode was 0.65V instead of the estimate of 0.6V (an error of 8%), 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:

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

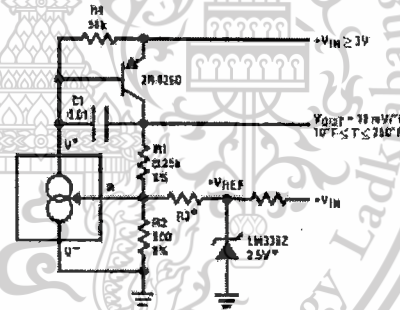
A 1mA LM134 current source with no temperature compensation would have a set resistor of 68Ω and a resulting tempco of

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

So even if the diode's tempco varies as much as ±4% from its estimated value, the circuit still eliminates 99% of the LM134's inherent tempco.

Typical Applications

Ground Referred Fahrenheit Thermometer



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

LM134/LM234/LM334

Typical Applications (Continued)

Terminating Remote Sensor for Voltage Output

$V_{OUT} = (1 + \frac{R}{R_{SET}}) \cdot \frac{10\text{mV}}{R} \cdot R_L$
 $R_{SET} = 700\Omega$
 $R_L = 10\text{k}\Omega$

Low Output Impedance Thermometer

$V_{OUT} = 10\text{mV} \cdot \frac{R}{R_L}$
 $Z_{OUT} < 10\text{m}\Omega$

*Output impedance of the LM134 at the "O" pin is approximately $\frac{10\text{m}\Omega}{10}$

where R_L is the equivalent external resistance connected from the "O" pin to ground. This residual resistance can be reduced by a factor of 5 or more by inserting an equivalent resistor $R_S = (R/10)$ in series with the output.

Low Output Impedance Thermometer

$V_{OUT} = 10\text{mV} \cdot \frac{R}{R_L}$
 $Z_{OUT} \text{ Appx } \leq 2\Omega$

Higher Output Current

$V_{OUT} = 10\text{mV} \cdot \frac{R}{R_L}$
 $Z_{OUT} < 10\text{m}\Omega$

*Select R_L and C_1 for optimum stability

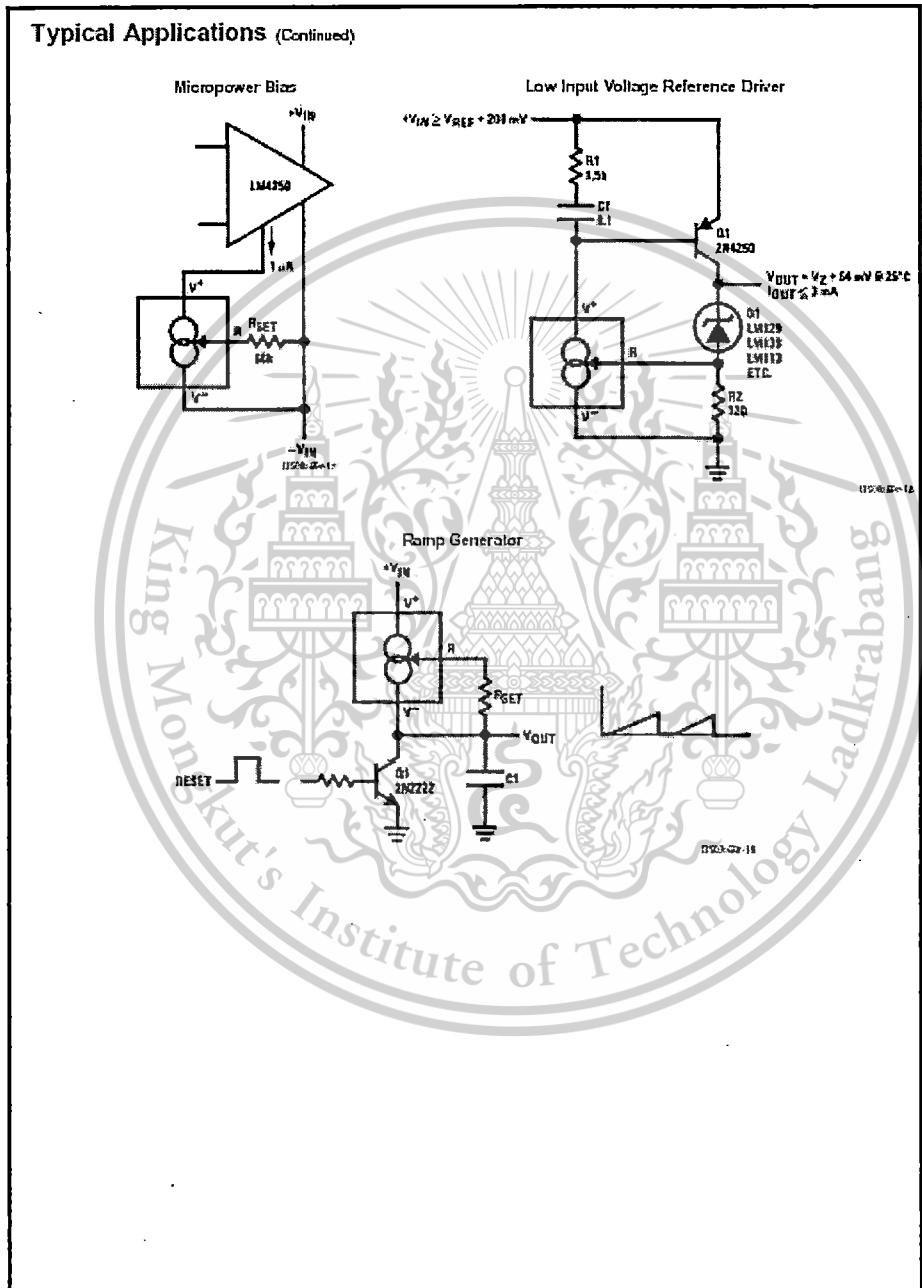
Basic 2-Terminal Current Source

$V_{OUT} = 10\text{mV} \cdot \frac{R}{R_L}$
 $Z_{OUT} < 10\text{m}\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



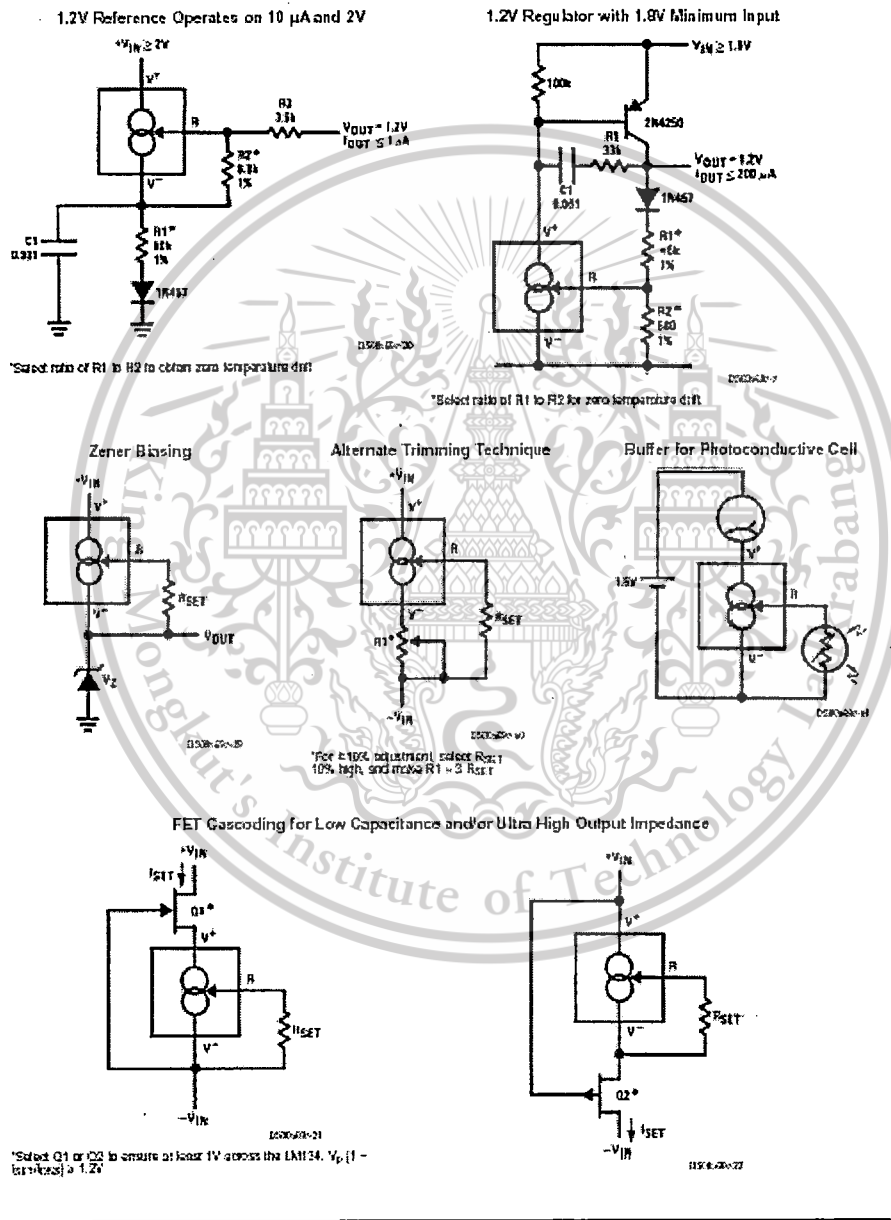
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

LM134/LM234/LM334

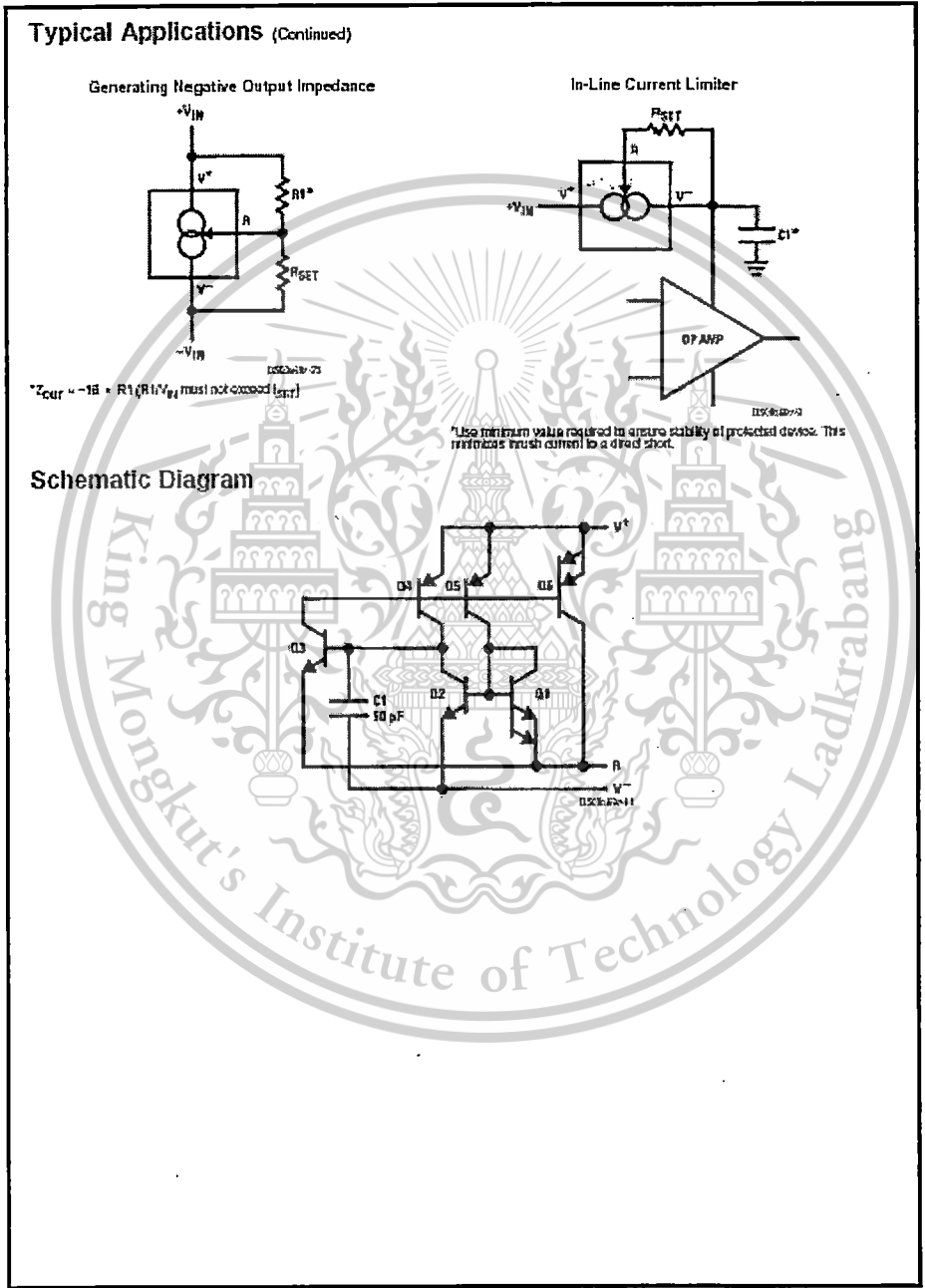
Typical Applications (Continued)



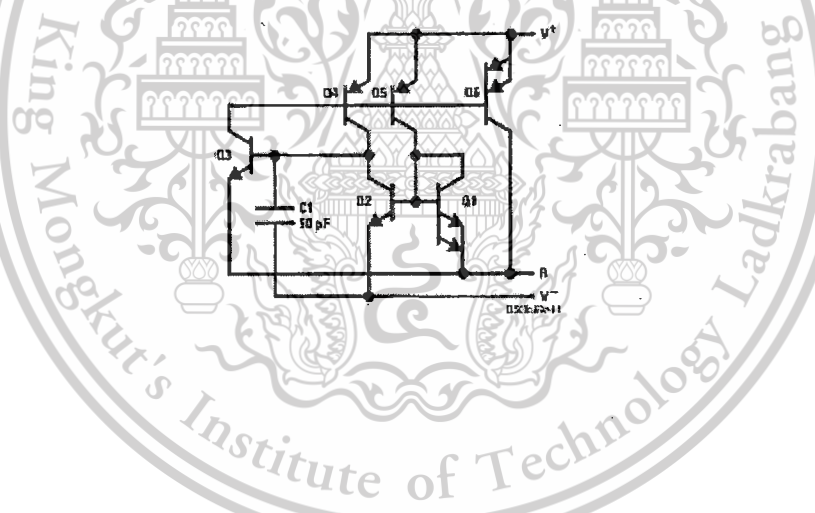
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



LM134/LM234/LM334

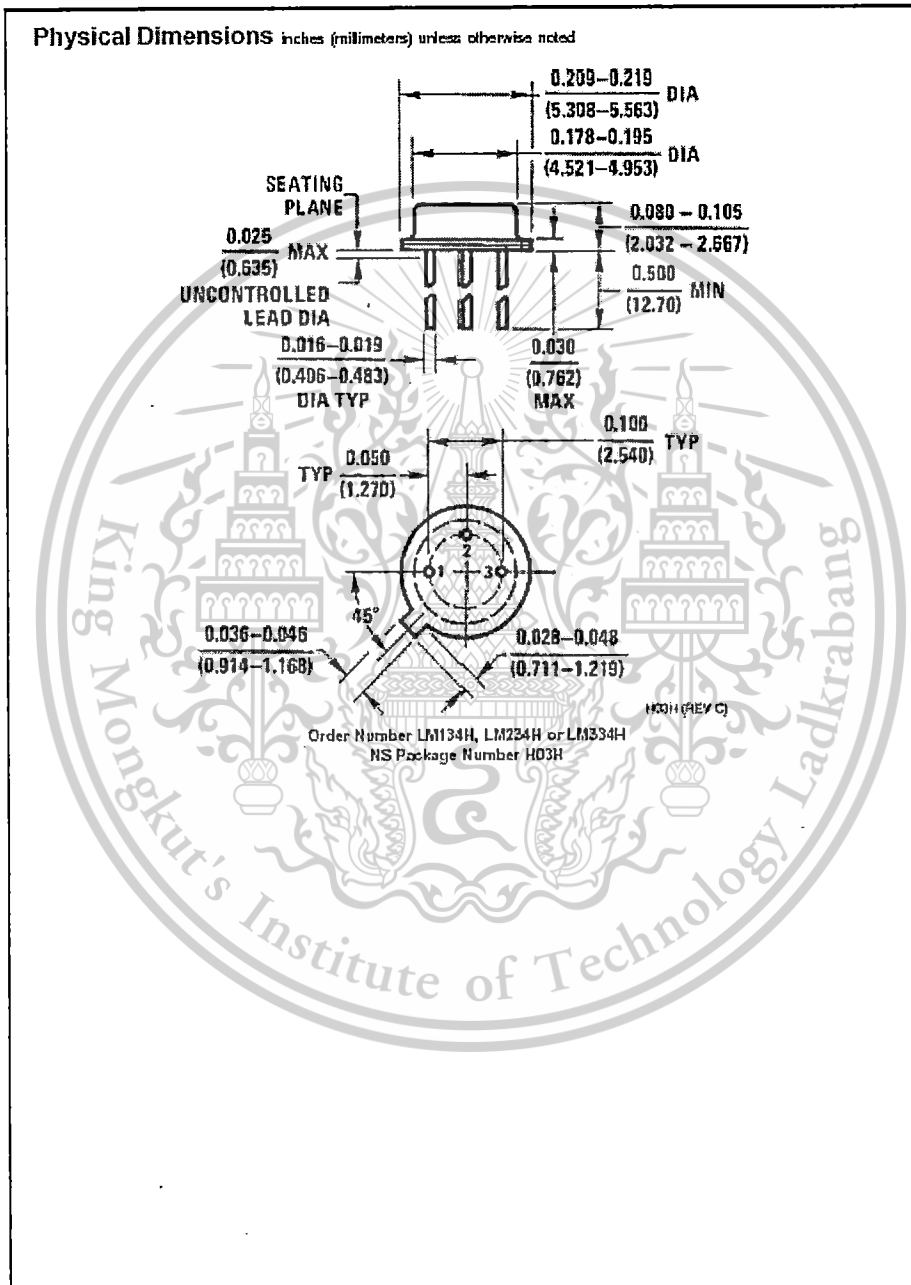


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

LM134H, LM234H, LM334H



www.national.com

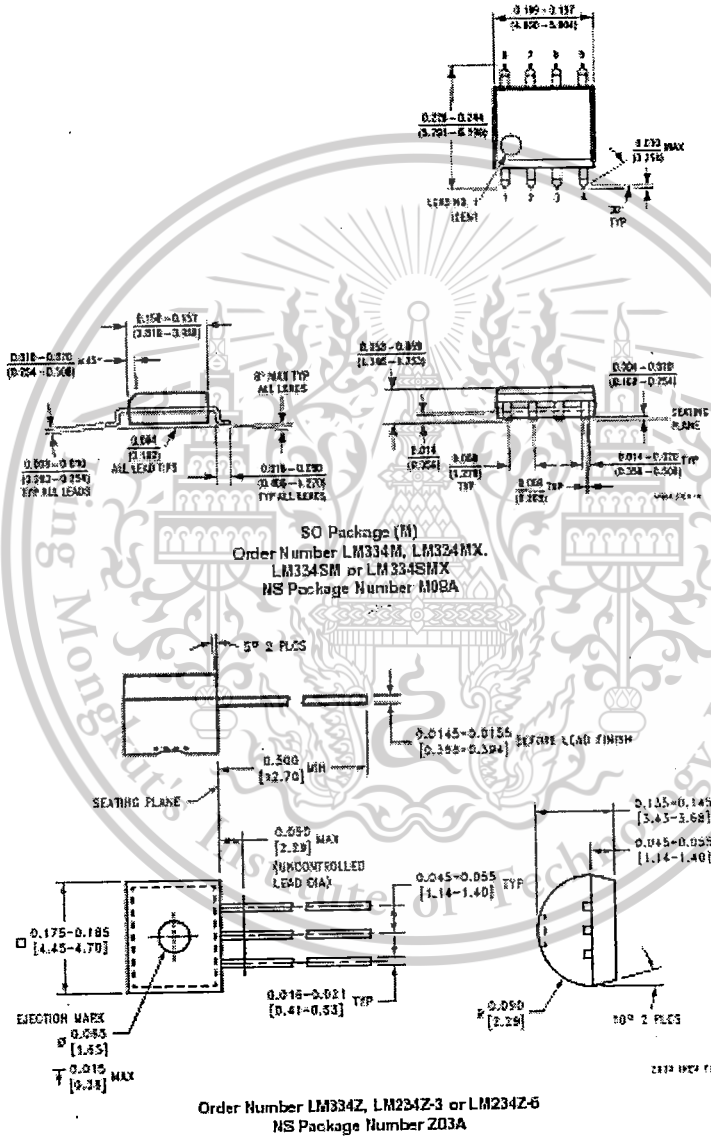
12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าในฐานะหัวหน้าโครงการวิจัย ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณทำให้โครงการนี้เกิดขึ้นและลุล่วงไปด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบคุณศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เอื้อเฟื้อสถานที่ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือการวิจัย ข้าพเจ้าขอขอบคุณคณะทำงานอันได้แก่ นายสุรเชษฐ์ วัฒนไพโรจน์ (ผู้ช่วยนักวิจัย) นายโสภณ พรหมชัย (นักศึกษาปริญญาโท) นายถาวร หงษ์อินทร์ และนายนาวิน นิลชาติ(นักศึกษปริญญาตรี) ที่มีส่วนสำคัญต่องานวิจัยนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บรรณานุกรม

1. ถาวร หงส์อินทร์, นาวิณ นิลชาติ “ทรานซิสเตอร์แม่เหล็ก” ปรินูญานิพนธ์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ปีการศึกษา 2544
2. 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
3. Radivoje S. Popovic and Rolf Widmer, “Magnetotransistor in CMOS Technology”, IEEE Trans. on Electron Device, Vol.ED-33, pp.1334-1339, 1986
4. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, “อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2544
5. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, “ฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2542
6. สมเกียรติ สุขเดช, “สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พิมพ์ครั้งที่ 7 กรุงเทพฯ, 2540
7. Gerold W. Neudeck, “The PN Junction Diode”, Addison-Wesley, Publishing, p.176, Company Inc, USA., 1989
8. Jaeger, Richard C. , “Introduction to microelectronic fabrication”, Addison-Wesley Publishing
9. Robert F. Pieret, “Semiconductor Device”, Printed in USA., 1996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.