

รายงานโครงการ

เครื่องวัดอุณหภูมิด้วยหัววัดสารกึ่งตัวนำ

Temperature Meter by Semiconductor Sensor



RCH
TK
7871-98
๓๗๗/๑

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....84481
วัน,เดือน,ปี.....13 ต.ค. 2551

สนับสนุนโดย เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร

11๙๙26๙๔
b
f

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนายรัฐพงษ์ นาคาไชย นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และนายวีระ เพ็งจันทร์ในการออกแบบสร้างและวัดคุณสมบัติหัววัดอุณหภูมิแบบสารกึ่งตัวนำ นายดำรง กอปรศรีสวัสดิ์ นายครีร์ อิงคณิษฐ์กุล และนายพีรวิทย์ หาญนวโชค นักศึกษาปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 หลักสูตรวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการทดสอบหัววัดสารกึ่งตัวนำกับอุณหภูมิต่างๆ ออกแบบและทดสอบวงจรวัดอุณหภูมิและการทำรายงานฉบับนี้ สุดท้ายขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนเงินทุนในโครงการครั้งนี้

รศ.ดร.เดิมีพงษ์ เพ็ชรภู



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ

สารบัญ

สารบัญรูปภาพ

บทที่ 1 บทนำ

1

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 เซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ

2.1.1 คุณสมบัติการขยายตัวของของเหลว (liquid expansion)

3

2.1.2 คุณสมบัติการขยายตัวของโลหะ (metal expansion and bimetallic strip)

3

2.1.3 คุณสมบัติของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (electrical resistance)

4

2.1.4 คุณสมบัติของการเปลี่ยนอุณหภูมิเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (thermoelectricity)

5

2.1.5 คุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (solid-state)

6

2.1.5.1 ตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดวงจรรวม

7

2.2 ทฤษฎีรอยต่อ พี-เอ็น

8

2.2.1 รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล

10

2.2.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

14

2.2.3 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

16

2.3 วงจรจ่ายกระแสแสงตัว

2.3.1 ความหมายของวงจรจ่ายกระแสแสงตัว

17

2.3.2 วงจรตั้งกระแสที่ที่ใช้ความต้านทานในการไบอัส

19

2.4 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง

22

2.5 วงจรปรับค่าความชื้นและตำแหน่งศูนย์

24

2.6 PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์

24

2.6.1 PIC Microcontroller ชนิดต่าง ๆ

25

2.6.2 PIC Microcontroller เบอร์ต่าง ๆ

30

2.6.3 โครงสร้างของ 16F876A PIC Microcontroller

30

2.6.3.1 คุณสมบัติของ PIC16F876A

31

2.6.3.2 โครงสร้างการทำงานภายในของ PIC16F876A

34

2.6.3.3 การจัดสรรหน่วยความจำโปรแกรมของ PIC16F876A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

2.6.3.4 การจัดสรรหน่วยความจำข้อมูล RAM ของ PIC16F876A	35
2.6.3.5 รีจิสเตอร์หลักของ PIC16F876A	38
บทที่ 3 กระบวนการสร้างไดโอดครนิตรอยต่อ พี-เอ็น	40
3.1 การเตรียมแผ่นผลึกซิลิกอน	40
3.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)	41
3.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 1	41
3.4 กระบวนการแพร่สารเจือ (Diffusion)	43
3.5 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 2	44
3.6 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metalization)	46
3.7 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 3	46
3.8 กระบวนการ Sintering	
บทที่ 4 ผลการทดลอง	48
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	60
หนังสืออ้างอิง	
ภาคผนวก	

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงภาพเทอร์โมมิเตอร์แบบ liquid-in-glass	3
รูปที่ 2.2 แสดงภาพแผ่นโลหะคู่ bimetallic strip	4
รูปที่ 2.3 (ก) ลักษณะของ RTD ชนิดต่างๆ (ข) ลักษณะของเทอร์มิสเตอร์แบบต่างๆ	5
รูปที่ 2.4 ลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลแบบต่างๆ	6
รูปที่ 2.5 วงจรพื้นฐานของแหล่งจ่ายกระแสที่ใช้หลักการของ PTAT	8
รูปที่ 2.6 ลักษณะแถบพลังงานเมื่อรอยต่ออยู่ในภาวะสมดุล	9
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ p-n	10
รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อ (ก) เมื่อไม่ได้รับไบอัส กับ (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัส V_A	11
รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า (ก) เมื่ออยู่ในภาวะสมดุลและ (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A	12
รูปที่ 2.10 การกระจายความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ (ก) เมื่อไม่ได้รับแรงดันไบอัส (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัส V_A	13
รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อ (ก) เมื่อไม่ได้รับไบอัส กับ (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$	14
รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่ออยู่ในภาวะสมดุลกับเมื่อได้รับ แรงดันไบอัสไบอัส $-V_A$	15
รูปที่ 2.13 การกระจายความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ (ก) เมื่อไม่ได้รับแรงดันไบอัส (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัส $-V_A$	16
รูปที่ 2.14 (ก) แสดงสัญลักษณ์ของวงจรคั่นกระแสแสดงตัว (ข) แสดงสัญลักษณ์ของวงจรคั่นกระแสแสดงตัว	17
รูปที่ 2.15 แสดงการวงจรคั่นกระแสที่โดยใช้ความต้านทานในการปรับอัตราส่วน กระแส I_1 และ I_2	17
รูปที่ 2.16 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง	19
รูปที่ 2.17 วงจรขยายสัญญาณอินสทรูเมนต์	20
รูปที่ 2.18 วงจรขยายสัญญาณอินสทรูเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง	21
รูปที่ 2.19 วงจรขยายสัญญาณอินสทรูเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง	22
รูปที่ 2.20 PIC16C5X	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่ 2.21 PIC12FXXX	27
รูปที่ 2.22 PIC17FXXX	28
รูปที่ 2.23 PIC16FXXX	29
รูปที่ 2.24 แผนผังการทำงานของ PIC 16F876A	31
รูปที่ 2.25 การจัดสรรหน่วยความจำโปรแกรมของ PIC 16F876A	34
รูปที่ 2.26 การจัดสรรหน่วยความจำข้อมูล RAM และตำแหน่งรีจิสเตอร์ของ PIC 16F876A	37
รูปที่ 2.27 รีจิสเตอร์ STATUS	38
รูปที่ 3.1 แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น	40
รูปที่ 3.2 กระบวนการออกซิเดชันครั้งที่ 1	41
รูปที่ 3.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีครั้งที่ 1	42
รูปที่ 3.4 Oxide Etching	42
รูปที่ 3.5 กระบวนการลอกฟิล์ม	43
รูปที่ 3.6 กระบวนการ Drive-in	44
รูปที่ 3.7 กระบวนการออกซิเดชันครั้งที่ 2	44
รูปที่ 3.8 Oxide Etching	45
รูปที่ 3.9 กระบวนการลอกฟิล์ม	45
รูปที่ 3.10 การเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศ	46
รูปที่ 3.11 กระบวนการออกซิเดชันครั้งที่ 3	46
รูปที่ 3.12 Al- Etching	47
รูปที่ 3.13 กระบวนการลอกฟิล์ม	47
รูปที่ 4.1 แสดงวงจรแหล่งจ่ายกระแสแรงดันที่ใช้ค่าความต้านทานเป็นตัวกำหนดค่ากระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์	48
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ที่อุณหภูมิค่าต่างๆที่ได้จากการ simulation ในโปรแกรม PSPICE ที่กระแสต่างกัน 5 เฟอร์	49
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ โดยกระแสต่างกัน 5 เฟอร์	49
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ ที่ได้จากการ simulation ในโปรแกรม PSPICE ที่กระแสต่างกัน 10 เฟอร์	50

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่4.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ โดย กระแสดำรงกัน 10 เมา	51
รูปที่4.6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ	52
รูปที่4.7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ โดยนำวงจรที่ต่อบนโฟโตบอร์ดเข้าเตาอบทั้งหมด	53
รูปที่4.8 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ โดยนำวงจรที่ต่อบนแผ่นปริ้นซ์เข้าเตาอบทั้งหมด	53
รูปที่4.9 วงจรที่ใช้ศึกษาผลของไดโอดที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE}	54
รูปที่4.10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ขณะที่มิและมีไม่มีไดโอด ที่อุณหภูมิค่าต่างๆที่ได้จากการ simulation ในโปรแกรม PSPICE	55
รูปที่4.11 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ขณะที่มิและมีไม่มีไดโอด ที่อุณหภูมิค่าต่างๆที่ได้จากการต่อวงจรลงบนโฟโตบอร์ด	55
รูปที่4.12 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ขณะที่มิและมีไม่มีไดโอด ที่อุณหภูมิค่าต่างๆที่ได้จากการ ต่อวงจรลงบนแผ่นปริ้นซ์	56
รูปที่ 4.13 แสดงวงจรที่ใช้ในการขยายสัญญาณและปรับแต่งสัญญาณ	56
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} หลังจากการขยาย และปรับแต่งสัญญาณที่อุณหภูมิค่าต่างๆ	57
รูปที่ 4.15 วงจรที่ใช้สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์	58

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของขา PIC 16F876A	32
ตารางที่ 2.2 ค่า PCLATH<4:3> ในการเลือก Page ของ 16F876A	34
ตารางที่ 2.3 ค่า RP0 และ RP1 ในการเลือก Bank ของ 16F876A	36
ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่แสดงบนจอ LCD กับค่าที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์	59



บทที่ 1

บทนำ

ในงานวิจัยนี้เป็นกรสร้างเครื่องวัดอุณหภูมิที่แสดงค่าเป็นตัวเลขมีค่าอยู่ในช่วง -10 องศาเซลเซียสถึง 150 องศาเซลเซียส โดยอาศัยหัววัดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่ประดิษฐ์จากห้องปฏิบัติการ โดยอาศัยหลักรอยต่อพีเอ็นสองรอยต่อที่มีค่ากระแสไหลที่แตกต่างกันซึ่งจะช่วยลดความไม่แม่นยำได้เป็นอย่างดี

หัววัดความร้อนมีอยู่หลายประเภทเช่น แบบตัวต้านทาน แบบฟิล์มบาง แบบใช้การขยายตัวของวัสดุเดียวเช่นเทอร์โมมิเตอร์ วัสดุคู่ที่ขยายตัวแตกต่างกันที่เรียกว่า ไบเมทัล (Bi-metal) เทอร์โมคัปเปิล แบบรอยต่อพีเอ็น และอยู่ในรูปวงจรรวม แต่ละแบบก็จะเหมาะสมตามการใช้งาน ข้อดีของแบบรอยต่อพีเอ็นคือมีความเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดทำให้ใช้งานประกอบวงจรเป็นเครื่องวัดอุณหภูมิได้ง่ายและเที่ยงตรง การใช้หลักไดโอดคู่เป็นการชดเชยทำให้ความเป็นเชิงเส้นสูงกว่ารอยต่อแบบรอยต่อเดียว โดยค่าเอาต์พุตอาศัยความแตกต่างค่าแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิไม่เท่ากันเนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านที่แตกต่างกัน

ค่าความเป็นเชิงเส้นจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ แต่จะขึ้นกับอัตราส่วนของกระแสที่ผ่านไดโอด จึงทำให้ค่าที่ได้มีความเที่ยงตรงสูง นอกจากนี้ช่วงการใช้งานกว้างครอบคลุมการใช้งานในอุตสาหกรรม แม้ในงานวิจัยนี้ได้เลือกช่วงใช้งานบางช่วงออกมาเท่านั้น ไม่ได้ใช้งานตลอดย่านที่ใช้งานได้ทั้งหมดทั้งนี้เพราะเพื่อความละเอียดในการแสดงค่า ซึ่งสามารถขยายให้มากขึ้นได้โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนในส่วนของหัววัดและวงจรตกแต่งสัญญาณแต่อย่างใด

นอกจากใช้งานโดยใช้รอยต่อพีเอ็นเป็นหัววัดแล้ว การใช้งานไดโอดสองตัวยังเหมาะที่จะสร้างเป็นแบบวงจรรวมเพราะความไว อัตราส่วนกระแสถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนของตัวต้านทาน ทำให้อัตราส่วนจะมีค่าคงที่เสมอเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงต่อช่วงการวัด

1.1) วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างหัววัดรอยต่อพีเอ็นจากห้องปฏิบัติการ
2. ประยุกต์ใช้หัววัดเป็นเครื่องวัดอุณหภูมิ
3. เป็นการใช้ศักยภาพของหน่วยงานให้เกิดประโยชน์สูงสุด
4. สร้างและพัฒนาทักษะและความรู้ให้แก่นักศึกษา

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1) เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (temperature) คือ ปริมาณทางฟิสิกส์ซึ่งเป็นหน่วยการวัดในการบ่งชี้ถึงระดับความร้อนหรือเย็นของอุปกรณ์สื่อสารใด ๆ โดยขณะที่เรารู้สึกว่าร้อนหรือเย็นนั้น สาเหตุก็เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในสาร กล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า อุณหภูมิ คือ การวัดหรือการบ่งชี้ถึงระดับพลังงานจลน์เฉลี่ย (average kinetic energy) ของโมเลกุลอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในสารนั่นเอง หากระดับพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของสารมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และในทางกลับกันอุณหภูมิจะมีค่าลดลงเมื่อพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่ลดลง

การวัดอุณหภูมิโดยทั่วไปมักแสดงระดับของความร้อนหรือเย็นในอุปกรณ์สื่อสารใด ๆ เมื่อเทียบกับระดับอุณหภูมิอ้างอิงซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ได้ตั้งเอาไว้ โดยแสดงผลออกมาในหน่วยของการวัดอุณหภูมิซึ่งมีอยู่ 4 หน่วยการวัด คือ

องศาฟาเรนไฮต์ (Fahrenheit, °F)

องศาเซลเซียส (Celsius, °C)

องศาเคลวิน (Kelvin, °K)

องศาแรงกิน (Rankine, °R)

การตรวจวัดอุณหภูมิ เป็นหลักการวัดพื้นฐานที่มีความสำคัญอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจาก ณ ที่อุณหภูมิมีค่าต่างกันนั้น อุปกรณ์สื่อสารแต่ละชนิดก็จะมีคุณสมบัติทางกายภาพ ตลอดจนพฤติกรรมที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันออกไป ตัวอย่างเช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารจะเปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิที่กระทำกับสารนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลง ปริมาตรของสารไม่ว่าจะเป็น โลหะของเหลว หรือก๊าซ ก็จะมีการขยายตัวเมื่ออุณหภูมิมีค่าเปลี่ยนไป หรือแม้กระทั่งอุณหภูมิภายในร่างกายมนุษย์ หรือสัตว์ที่มีการเปลี่ยนแปลงขณะเจ็บป่วย ไม่สบาย เป็นต้น

ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ รวมทั้งเทคนิคในการนำเอาสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิไปใช้งานต่อหรือประมวลสัญญาณต่อไปในระบบการวัดหรือระบบควบคุมค่ากระบวนการ เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ใช้กันในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายชนิด ซึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลักการในการตรวจสอบอุณหภูมิที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป โดยอาศัยคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

- คุณสมบัติการขยายตัวของของเหลว (liquid expansion)
- คุณสมบัติการขยายตัวของโลหะ (metal expansion)
- คุณสมบัติของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (electrical resistance)
- คุณสมบัติของการเปลี่ยนอุณหภูมิเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (thermoelectrivity)
- คุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (solid state)

2.1.1) คุณสมบัติการขยายตัวของของเหลว (liquid expansion)

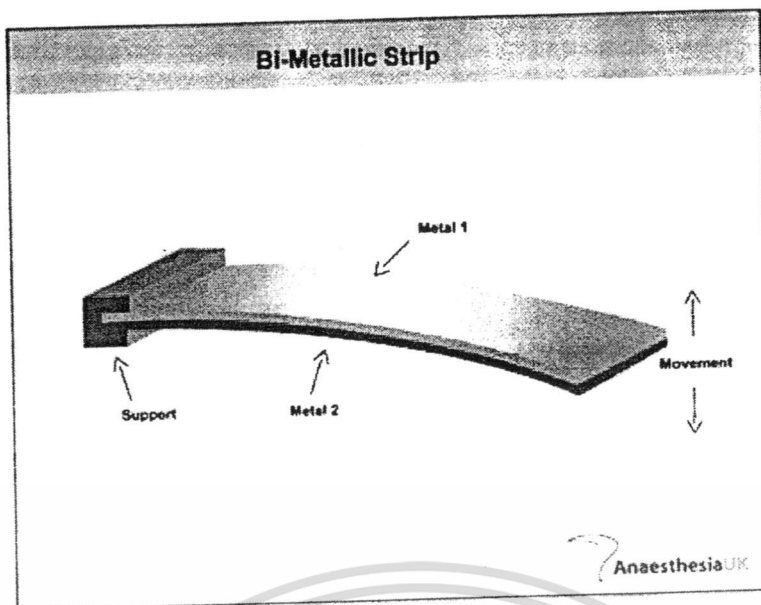
เทอร์โมมิเตอร์แบบนี้จะอาศัยคุณสมบัติการขยายตัวในเชิงปริมาตรของของเหลวเมื่ออุณหภูมิที่มากกระทามีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยปริมาตรของเหลวที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะถูกปรับเทียบเปลี่ยนสเกลออกมาให้อยู่ในรูปหน่วยของอุณหภูมินั่นเอง ทั้งนี้หากเปรียบเทียบกับคุณสมบัติการขยายตัวเชิงปริมาตรในโลหะและก๊าซ เมื่ออุณหภูมิมียค่าเปลี่ยนแปลงไปพบว่าของเหลวจะมีคุณสมบัติในการขยายตัวเชิงปริมาตรได้มากกว่า สามารถสังเกตผลและอ่านค่าได้ชัดเจนกว่าการใช้โลหะหรือก๊าซเป็นสารในการตรวจสอบอุณหภูมิ เช่น เทอร์โมมิเตอร์แบบ liquid-in-glass ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 และ เทอร์โมมิเตอร์แบบ liquid-in-metal



รูปที่ 2.1 แสดงภาพเทอร์โมมิเตอร์แบบ liquid-in-glass

2.1.2) คุณสมบัติการขยายตัวของโลหะ (metal expansion and bimetallic strip)

ในที่นี้คำว่า “bimetallic strip” หมายถึง อุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วยแผ่นโลหะสองชนิดที่มีความยาวเท่ากัน แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว (coefficient of expansion) ต่างกัน นำมายึดติดไว้ด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ตัวอย่างของแผ่นโลหะคู่ bimetallic strip ที่นิยมนำมาใช้งาน เช่น แผ่นทองเหลืองซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวสูง กับแผ่นโลหะผสมระหว่างเหล็ก-นิกเกิลที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ



รูปที่ 2.2 แสดงภาพแผ่นโลหะคู่ bimetallic strip

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าปลายด้านหนึ่งของแผ่นโลหะคู่ bimetallic strip ถูกยึดอยู่กับที่ และเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของแผ่นโลหะทั้งสองชนิดที่มีค่าต่างกัน ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิรอบข้างมีการเปลี่ยนแปลงจึงทำให้แผ่นโลหะคู่เกิดการโค้งงอขึ้นเป็นไปตามสัดส่วนของค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป คุณสมบัติของแผ่นโลหะคู่ bimetallic strip ดังกล่าวข้างต้นเป็นหลักการทำงานพื้นฐานที่สำคัญของ เทอร์โมสตาด (thermostat) และเทอร์โมมิเตอร์แบบ bimetallic

2.1.3) คุณสมบัติของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (electrical resistance)

คุณสมบัติของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุตัวนำใด ๆ จะมีการแปรค่าไปตามผลของอุณหภูมิรอบข้าง โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงสามารถเขียนอธิบายได้ด้วยสมการเชิงเส้นดังต่อไปนี้

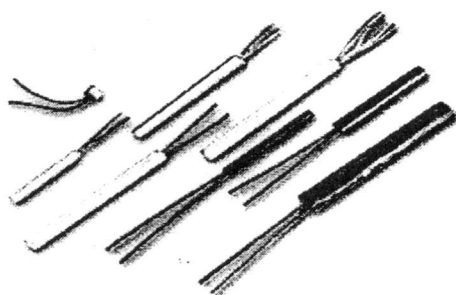
$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (2.1)$$

โดยที่ R_0 คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุตัวนำที่อุณหภูมิเท่ากับ 0°C มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

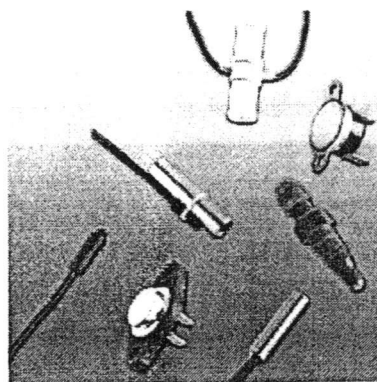
R_t คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุตัวนำที่อุณหภูมิเท่ากับ $t^\circ\text{C}$ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

และ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุตัวนำ

เซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ใช้คุณสมบัตินี้ เช่น RTD (resistance temperature detector) เทอร์มิสเตอร์ (thermistor) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



(ก)



(ข)

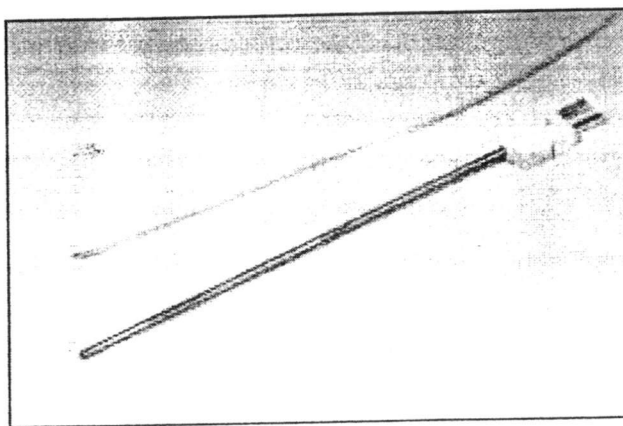
รูปที่ 2.3 (ก) ลักษณะของ RTD ชนิดต่างๆ (ข) ลักษณะของเทอร์มิสเตอร์แบบต่างๆ

2.1.4) คุณสมบัติของการเปลี่ยนอุณหภูมิเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (thermoelectricity)

คุณสมบัติของการเปลี่ยนอุณหภูมิเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (thermoelectricity) หมายถึง สัญญาณไฟฟ้าซึ่งกำเนิดโดยพลังงานความร้อน ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดย Thomas J. Seebeck ในราวปี ค.ศ. 1821 และต่อมาได้เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “Seebeck effect”

ปรากฏการณ์ Seebeck effect เกิดจากการนำเอาโลหะตัวนำต่างชนิดกันสองตัว เช่นบิสมัท กับทองแดง นำมาเชื่อมปลายเข้าด้วยกันแล้วให้ความร้อน จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า e.m.f (Electromotive Force) ขึ้นที่ปลายอีกด้านหนึ่ง และเรียกแรงเคลื่อนไฟฟ้า e.m.f นี้ว่า “แรงดันไฟฟ้า Seebeck (Seebeck voltage, V_s)” หลังจากนั้นไม่นานนัก A.C. Becquerel ได้นำหลักการของ Seebeck effect ไปประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์สำหรับการตรวจวัดอุณหภูมิ และตั้งชื่ออุปกรณ์ชนิดนี้ว่า “เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple)”

รูปที่ 2.4 แสดงวงจรเทอร์โมคัปเปิลพื้นฐานและลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลในรูปแบบต่าง ๆ เทอร์โมคัปเปิลซึ่งถูกบรรจุอยู่ในฝาครอบป้องกันจะทำหน้าที่เป็นโพรบ (probe) นำไปยึดติดกับชิ้นงานหรืออุปกรณ์ที่ต้องการตรวจสอบอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่จุดตรวจสอบ (hot junction) กับจุดอ้างอิง (cold junction) แล้ว ด้วยคุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิล จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า e.m.f. หรือแรงดันไฟฟ้า Seebeck ขึ้น (ปกติมีค่าอยู่ในช่วง mV) เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นในวงจร โดยมีขนาดและทิศทางในการไหลขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะตัวนำของเทอร์โมคัปเปิลและค่าของอุณหภูมิที่ต้องการตรวจสอบ โวลต์มิเตอร์ที่ต่อทางด้านปลายอีกด้านหนึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แสดงผลให้กับผู้อ่านซึ่งมีการเปรียบเทียบให้ค่าที่อ่านได้ออกมาอยู่ในรูปหน่วยของอุณหภูมิ



รูปที่ 2.4 ลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลแบบต่างๆ

เทอร์โมคัปเปิล สามารถนำไปใช้วัดอุณหภูมิของโลหะ ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ โดยมีช่วงการวัดประมาณ 73°K จนถึงมากกว่า $2,273^{\circ}\text{K}$ (-200°C จนถึงมากกว่า $+2,000^{\circ}\text{C}$) โดยมีความแม่นยำในการวัดขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะตัวนำที่นำมาทำเป็นเทอร์โมคัปเปิล แต่ทั่วไปจะมีความแม่นยำน้อยกว่าการวัดโดยใช้เทอร์มิสเตอร์แบบ electrical resistance

เทอร์โมคัปเปิลถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย ยกตัวอย่างเช่น ในการตรวจวัดอุณหภูมิในเตาเผา ในอุตสาหกรรมหลอมเหล็ก หรือแม้กระทั่งในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการนำไปประยุกต์ใช้ตรวจวัดและแสดงอุณหภูมิในงานด้านการแพทย์ด้วย สาเหตุสำคัญที่เทอร์โมคัปเปิลเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายประการหนึ่งก็คือ สามารถนำไปใช้วัดอุณหภูมิของอุปกรณ์และชิ้นงานที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้นั่นเอง ตัวอย่างเช่น การตรวจวัดอุณหภูมิของชิ้นส่วนในสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor components) เป็นต้น

2.1.5) คุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (solid-state)

จากคุณสมบัติในการทำงานของเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิทั้งสามชนิด คือ เทอร์มิสเตอร์ RTD และเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วไบนั้น จะพบว่าผลตอบสนองของเทอร์มิสเตอร์มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงและมีย่านการวัดแคบ ส่วนเทอร์โมคัปเปิลจะให้ผลตอบสนองก่อนข้างไม่เป็นเชิงเส้น มีย่านการวัดกว้าง แต่สัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีขนาดเล็กมาก ทั้งยังต้องการจุดอ้างอิงอุณหภูมิในการวัดอีกด้วย ในขณะที่ RTD จะมีผลตอบสนองที่มีความเป็นเชิงเส้นแต่ยังคงมีขนาดของสัญญาณเอาต์พุตเล็กมากเช่นกัน ด้วยปัจจัยสำคัญที่เป็นข้อจำกัดในการใช้งานของเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิทั้งสามชนิดข้างต้น จึงได้มีการพัฒนานำเอาคุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมาทำในรูปแบบของวงจรรวม (integrated circuit, IC) เพื่อใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ เช่น LM335 , LM34 , AD592 เป็นต้น

2.1.5.1) ตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดวงจรรวม

ในตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบวงจรรวม วงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น วงจรไบอัส วงจรแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล จะถูกสร้างพร้อมกับตัวทรานซิสเตอร์บนชิพเดียวกัน ตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดวงจรรวมที่รู้จักกันดีคือ ตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่ใช้หลักการของPTATซึ่งจะให้ผลตอบสนองออกมาในรูปของกระแส หรือความต่างศักย์ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์

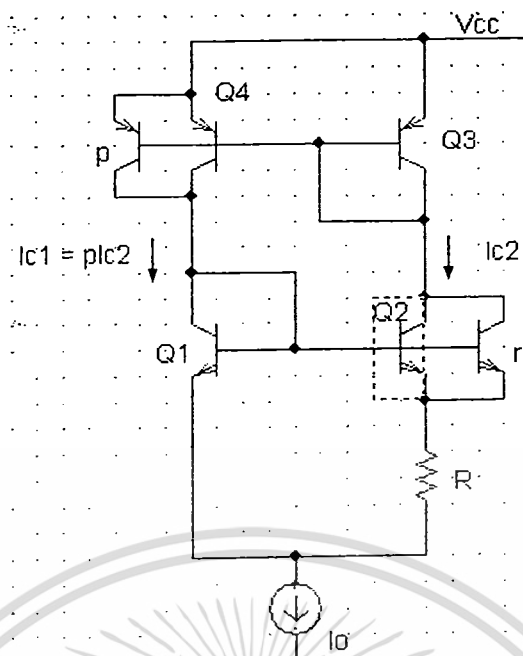
สัญญาณพื้นฐานในตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบPTAT คือความต่างศักย์ ΔV_{BE} ระหว่างส่วนเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์2ตัว ที่มีสัดส่วนของกระแสแตกต่างกันตามความหนาแน่นของกระแสอิมิตเตอร์ขณะที่อยู่ที่อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} หาได้จากสมการ(2.2)

$$\Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{C1} J_{S2} A_{e2}}{I_{C2} J_{S1} A_{e1}} \right) \quad (2.2)$$

จากการที่ทรานซิสเตอร์ทั้ง2 ตัวถูกสร้างอยู่บนชิพเดียวกันทำให้ $J_{S2} = J_{S1}$ และอัตราส่วนของพื้นที่ของส่วนอิมิตเตอร์กำหนดโดย $r = A_{e2}/A_{e1}$ และอัตราส่วนของกระแสคอลเลคเตอร์ $p = I_{C1}/I_{C2}$ ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ทำได้เป็นสมการ(2.3)

$$\Delta V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln(pr) \quad (2.3)$$

จากรูปที่2.5แสดงถึงวงจรพื้นฐานของแหล่งจ่ายกระแสที่ใช้หลักการของPTAT โดยที่ทรานซิสเตอร์Q1และQ2 มีอัตราส่วนพื้นที่ของส่วนอิมิตเตอร์เป็น r และทรานซิสเตอร์Q3และQ4 เป็นวงจรสะท้อนกระแสที่มีอัตราส่วนของกระแสคอลเลคเตอร์ p



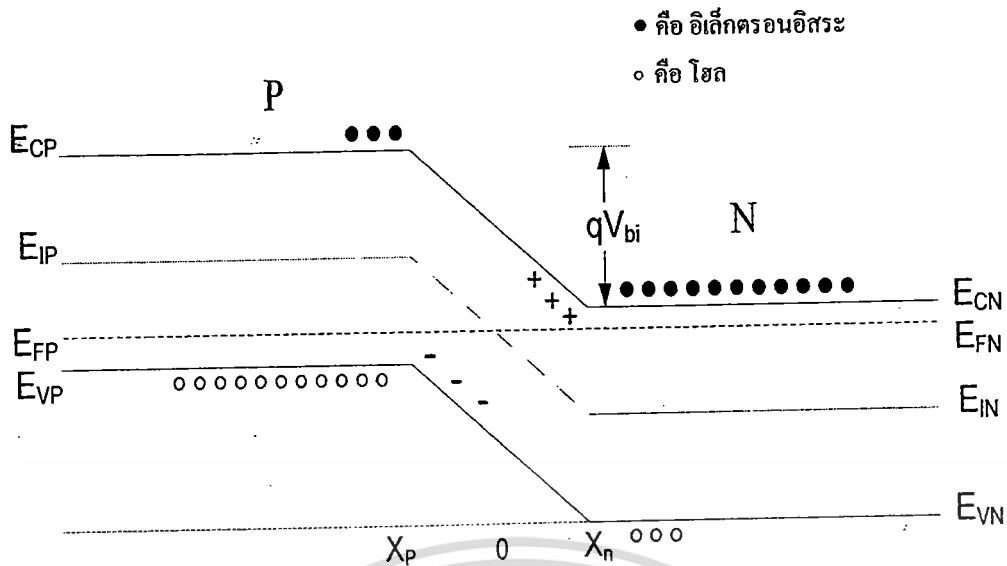
รูปที่ 2.5 วงจรพื้นฐานของแหล่งจ่ายกระแสที่ใช้หลักการของ PTAT

2.2) ทฤษฎีรอยต่อ พี-เอ็น

วิธีการหนึ่งในการนำสารกึ่งตัวนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถทำได้โดยการเติมอะตอมสารเจือ (impurity atoms) ลงไป เพื่อทำให้เกิดเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ชนิดพีและชนิดเอ็น จากนั้นจึงนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเรียกว่า อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor devices) ซึ่งมีโครงสร้างที่ง่ายที่สุดคือ โครงสร้างของรอยต่อ พี-เอ็น (p-n junction) เช่น ไดโอดชนิดต่างๆ เป็นต้น

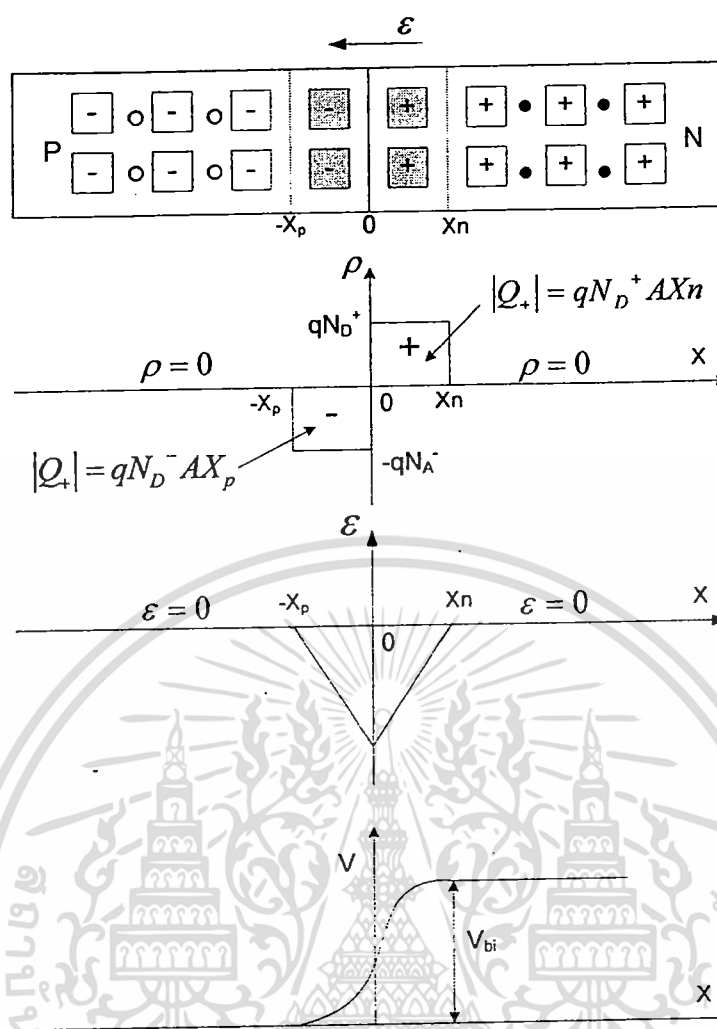
2.2.1) รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล

ในเบื้องต้นนี้จะเริ่มพิจารณาถึงรอยต่อพี-เอ็นชนิดขั้นบันได (step junction) ซึ่งจะได้ว่าเนื่องจากความหนาแน่นประจุพาหะของด้านทั้งสองของรอยต่อพี-เอ็นมีค่าไม่เท่ากัน จึงเกิดการแพร่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะ เพื่อให้ด้านทั้งสองมีความหนาแน่นประจุพาหะเท่ากัน โดยอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นจะแพร่ข้ามไปยังด้านพีและโฮลทางด้านพีก็จะแพร่ข้ามไปยังด้านเอ็นซึ่งสามารถพิจารณาได้จากลักษณะแถบพลังงาน ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะแถบพลังงานเมื่อรอยต่ออยู่ในภาวะสมดุล

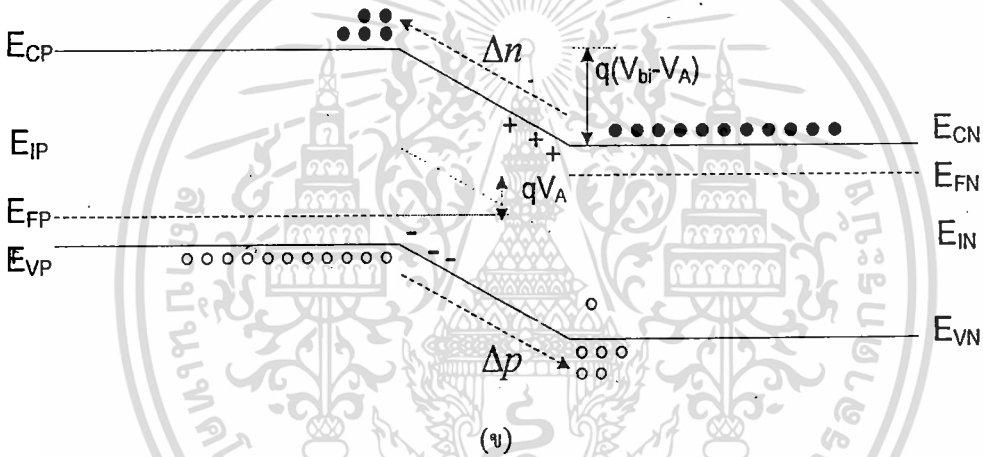
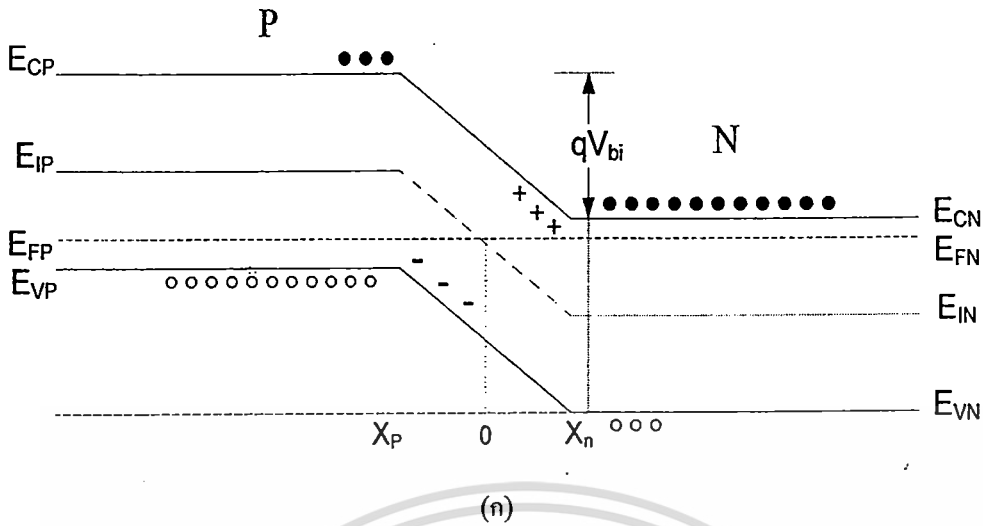
เมื่อเกิดการแพร่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะก็จะทำให้เกิดการรวมตัว (recombination) ระหว่างอิเล็กตรอน-โฮล และทำให้อะตอมสารเจือผู้ให้ทางด้านเอ็นที่บริเวณรอยต่อมีสภาพเป็นไอออนบวก ส่วนอะตอมสารเจือผู้รับทางด้านพีมีสภาพเป็นไอออนลบ ซึ่งประจุไฟฟ้าดังกล่าวทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นบริเวณรอยต่อและเกิดการสะสมประจุไฟฟ้าขึ้นบริเวณรอยต่อ โดยอำนาจของสนามไฟฟ้าจะต่อต้านการเคลื่อนที่ของประจุพาหะส่วนมากในการข้ามรอยต่อจนในที่สุดการแพร่ข้ามรอยต่อดำเนินไปจนถึงภาวะสมดุล (equilibrium) นั่นคือ กระแสการแพร่มีค่าเท่ากับกระแสดริฟท์ ทำให้บริเวณรอยต่อนั้นแทบจะไม่มีพาหะอยู่เลย เนื่องจากถูกอิทธิพลของสนามไฟฟ้าพัดพาออกไป จึงเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณปลอดพาหะ (depletion region) และการที่มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อแสดงว่ามีความต่างศักย์ทำให้เกิดแรงดันภายในขึ้น (built in voltage) ระหว่างด้านพีและด้านเอ็น หรืออาจเรียกว่า ศักย์สัมผัส (contact potential) ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ p-n

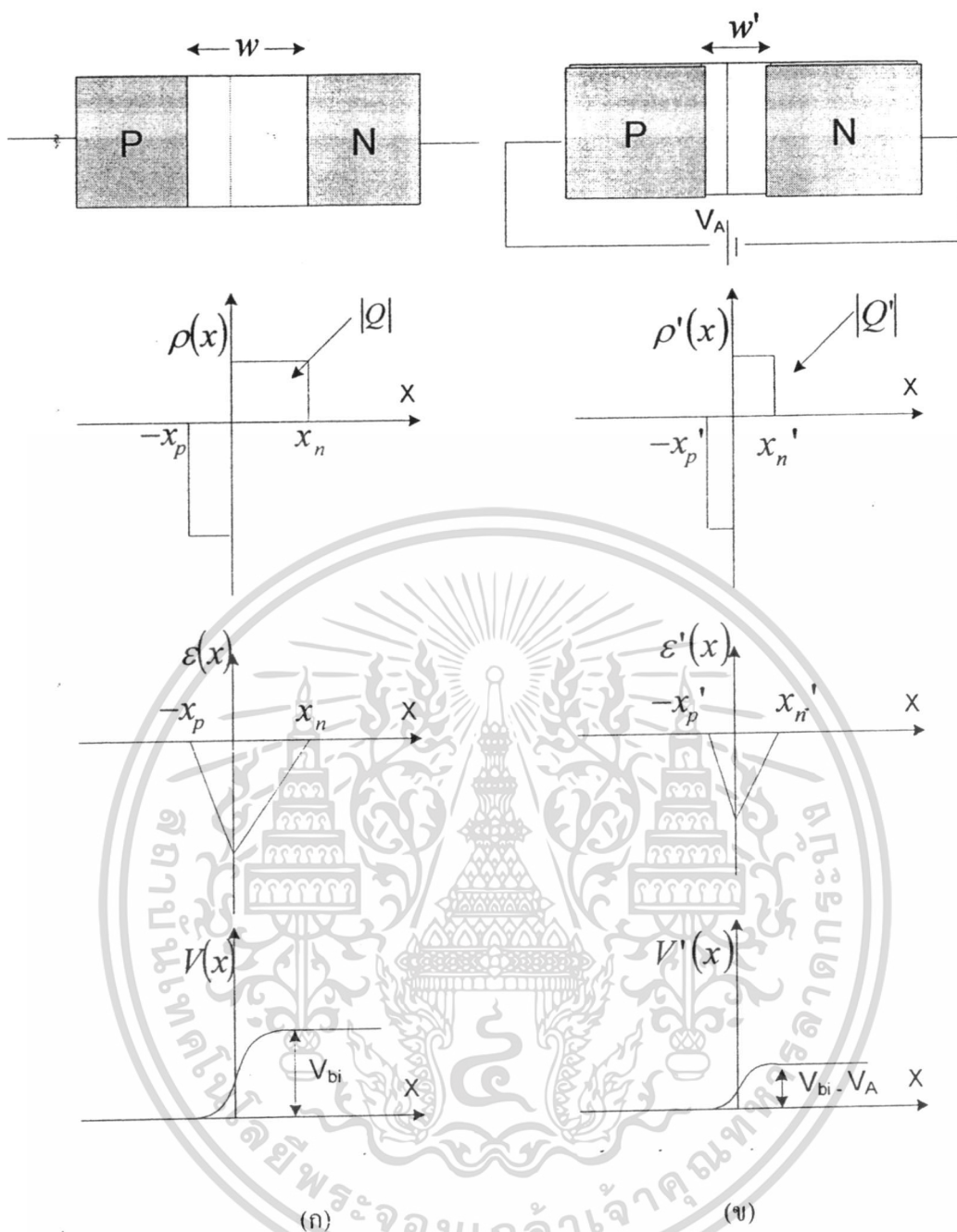
2.2.2) รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

การให้แรงดันไบอัสตรง (forward bias : V_A) ทำได้โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าที่ด้านพีเป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านเอ็น โดยการกำหนดให้ความต้านทานในส่วนของเนื้อสารกึ่งตัวนำมีค่าน้อยมาก จึงพิจารณาได้ว่าไม่มีแรงดันตกคร่อมในส่วนของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นแรงดัน V_A ทั้งหมดจะไปปรากฏที่รอยต่อพี-เอ็นและมีทิศทางตรงข้ามกับศักย์ภายในรอยต่อจึงเกิดการหักล้างของแรงดัน กำแพงศักย์จะมีค่าลดลงเป็น $(V_{bi} - V_A)$ ทำให้สนามไฟฟ้าภายในรอยต่อมีขนาดลดลง จึงเกิดการแพร่ของประจุพาหะได้มากขึ้น โดยโฮลทางด้านพีจะแพร่ไปยังด้านเอ็นและอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นจะแพร่ไปด้านพีและกลายเป็นพาหะส่วนน้อย ระดับพลังงานเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อจะแตกต่างกัน qV_A ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อ (ก)เมื่อไม่ได้รับไบอัส กับ (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัส V_A

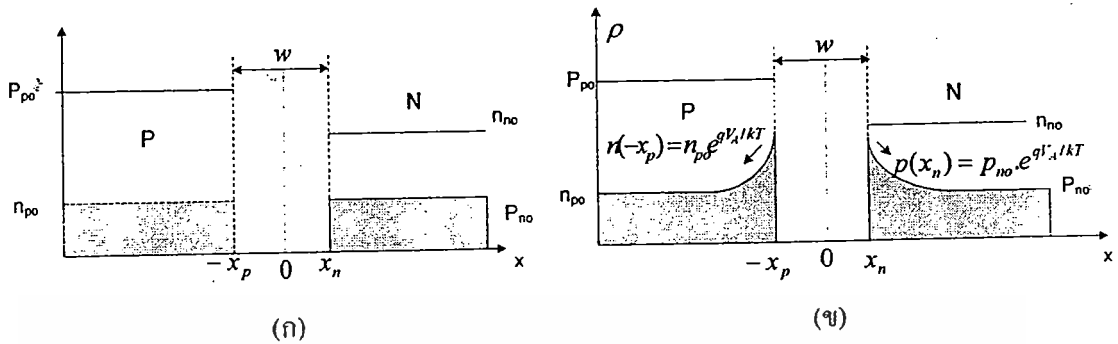
เมื่อเกิดการแพร่ของประจุพาหะก็จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร เรียกว่า กระแสไบอัสตรง และการที่สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อลดลงจะทำให้ขนาดความกว้างบริเวณปลอดพาหะลดลง หรือก็คือการลดลงของประจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อนั่นเอง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า (ก) เมื่ออยู่ในภาวะสมดุล และ(ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการเพิ่มขึ้นของพาหะส่วนน้อยที่ขอบของบริเวณปลอดพาหะอธิบายได้จากสมการกฎของรอยต่อ P_{po} และ N_{po} ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การกระจายความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ (ก) เมื่อไม่ได้รับแรงดันไบอัส (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัส V_A

เมื่อ P_{po} คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านพี

เมื่อ N_{po} คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านพี

เมื่อ N_{no} คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านเอ็น

เมื่อ P_{no} คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านเอ็น

ส่วนการลดลงของพาหะส่วนน้อยเมื่อระยะห่างออกไปจากบริเวณปลอดพาหะจะเกิดการรวมตัว(recombination) ของพาหะทำให้ปริมาณของพาหะที่ถูกฉีดเข้ามาลดลงจนกระทั่งในที่สุดที่ระยะ L_e และ L_n ความหนาแน่นของประจุส่วนน้อยจะลดลงจนเป็นศูนย์ เนื่องจากความหนาแน่นของประจุพาหะส่วนมาก N_{no} และ P_{po} มีค่ามากกว่าปริมาณของพาหะที่ถูกฉีดเข้ามารอยต่อมาก ดังนั้นค่าของประจุพาหะดังกล่าวที่บริเวณรอยต่อจะไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้ว่าจะมีการฉีดพาหะเข้ามารอยต่อ แต่จะถือว่ามีย่าน้อยมากดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อจึงเป็นกระแสการแพร่ของประจุพาหะส่วนน้อย ซึ่งสามารถแยกพิจารณาเป็นกระแสโฮลและกระแสอิเล็กตรอนและจะได้เป็นกระแสรวม คือ

$$I_0 = qAn_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \quad (2.4)$$

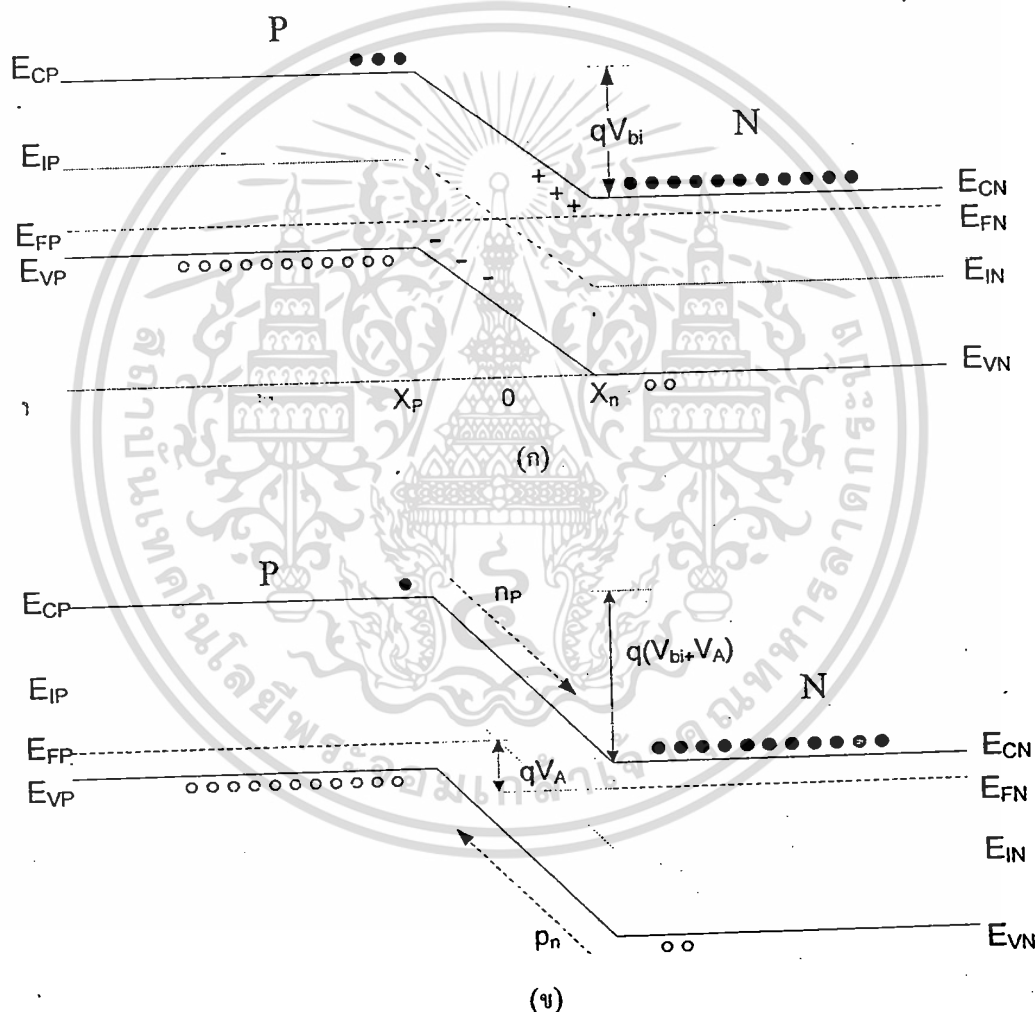
$$I = I_0 \cdot (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.5)$$

เมื่อ N_A คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้รับ (อะตอม/ลบ.ซม)

เมื่อ N_D คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือให้ (อะตอม/ลบ.ซม)

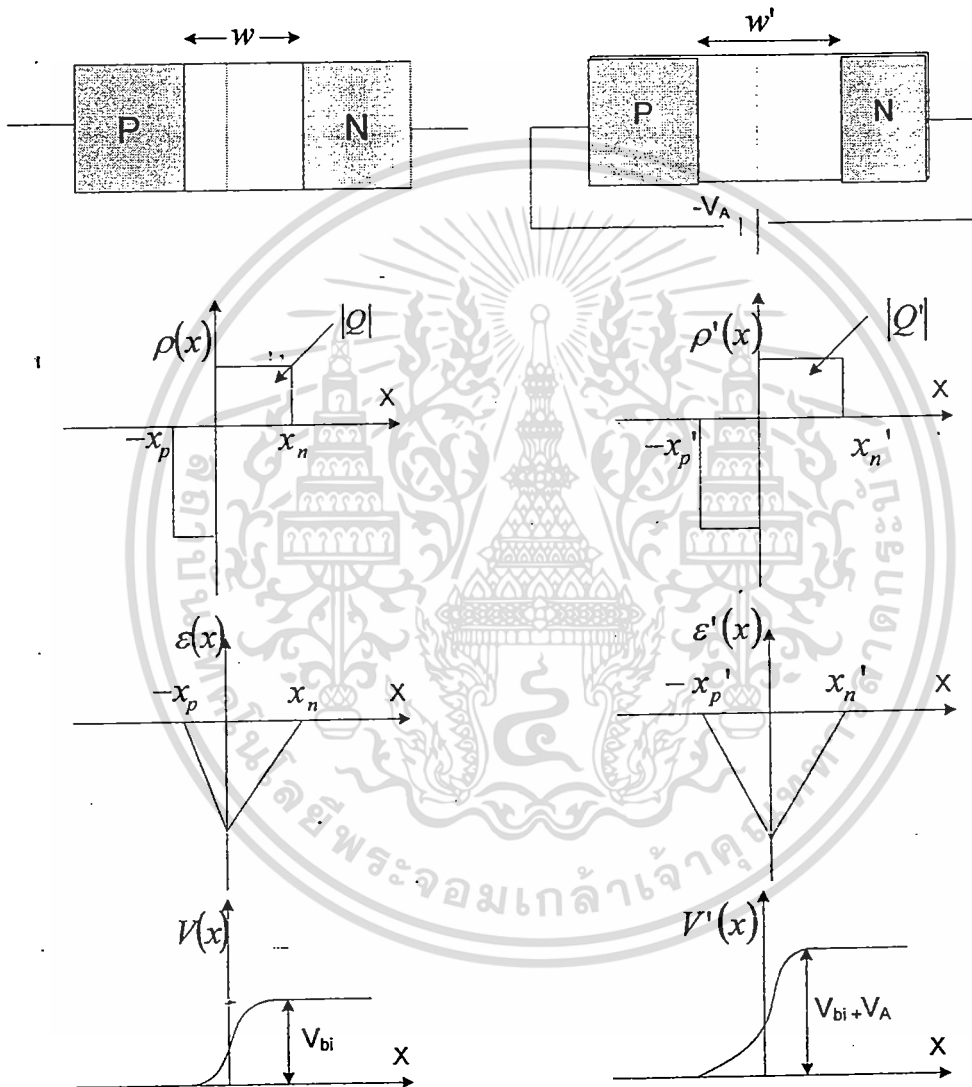
2.2.3) รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

การให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ(Reverse bias : $-V_A$) ทำได้โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าที่ด้านพีเป็นลบ เมื่อเทียบกับด้านเอ็นโดยการกำหนดให้ความต้านทานในส่วนของเนื้อสารกึ่งตัวนำมีค่าน้อยมาก จึงพิจารณาได้ว่าไม่มีแรงดันตกคร่อมในส่วนของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นแรงดัน V_A ทั้งหมดจะไปปรากฏที่รอยต่อพี-เอ็นและมีทิศทางเดียวกับศักย์ภายในรอยต่อจึงเกิดการเสริมกันของแรงดัน ทำให้ค่าแรงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $(V_{bi} + V_A)$ ทำให้สนามไฟฟ้าภายในรอยต่อมีขนาดเพิ่มขึ้น ประจุพาหะโฮลทางด้านพีอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นจะถูกสนามไฟฟ้าผลักให้เคลื่อนที่ห่างออกไป ทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายกว้างมากขึ้น ระดับพลังงานเฟอร์มิของด้านพีจะสูงกว่าด้านเอ็น qV_A ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



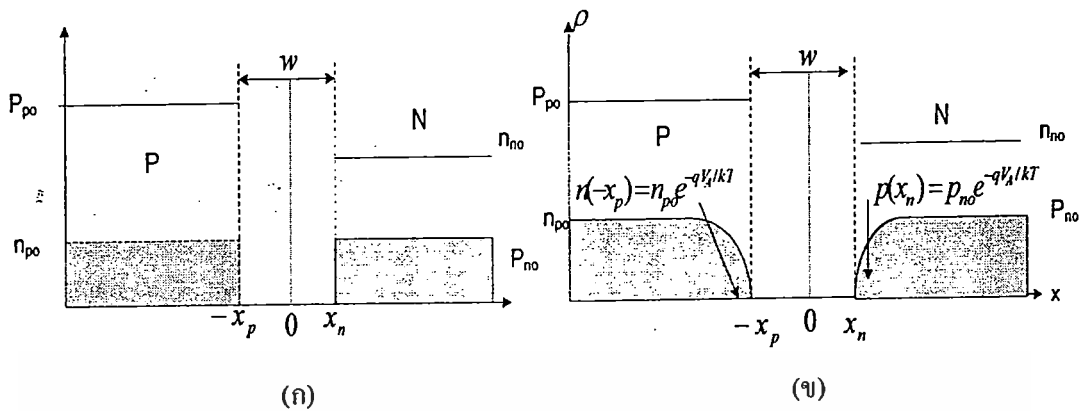
รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อ (ก) เมื่อไม่ได้รับไบอัส กับ (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$

เมื่อกำแพงศักย์เพิ่มขึ้นจึงเกิดการแพร่ของประจุพาหะได้น้อยลง ทำให้โฮลจากด้านพี และ อิเล็กตรอนจากด้านเอ็นไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ มีแต่เพียงพาหะส่วนน้อยเท่านั้นที่สามารถจะเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปได้จึงทำให้เกิดมีกระแสค่าหนึ่งที่มีขนาดน้อยมากไหลผ่านรอยต่อ เรียกกระแสนี้ว่า กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ และจะพบว่ากรณีที่สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดความกว้างบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้น หรือก็คือการเพิ่มขึ้นของประจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อนั่นเอง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่ออยู่ในภาวะสมดุลกับเมื่อได้รับแรงดันไบอัสไบอัส $-V_A$

ส่วนการลดลงของพาหะส่วนน้อยที่ขอบของบริเวณปลอดพาหะอธิบายได้จากสมการกฎของรอยต่อ Pn และ Np ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การกระจายความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ
(ก) เมื่อไม่ได้รับแรงดันไบอัส (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัส $-V_A$

ในขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$ เมื่อแทนค่าลงไปในสมการ 2.5 แล้วจะพบว่าเทอมของ $(e^{qV_A/kT})$ จะมีค่าน้อยกว่า 1 มากๆ ดังนั้น

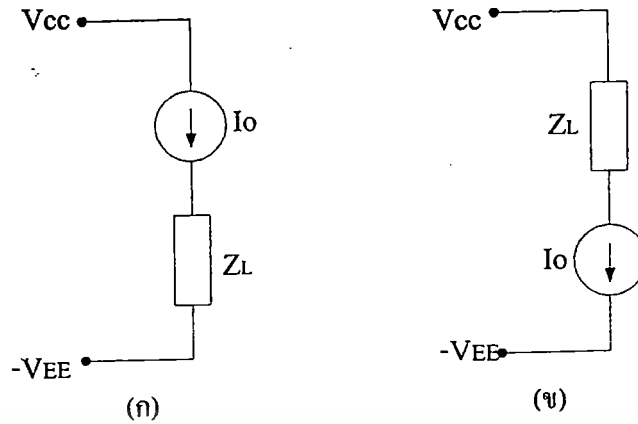
$$I_R = -I_0 = -qA n_i \quad (2.6)$$

2.3) วงจรจ่ายกระแสคงตัว

วงจรจ่ายกระแสคงตัว (Constant current circuits) เป็นวงจรหัวใจสำคัญของ IC โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรที่มีสัญญาณออกและสัญญาณเข้าอยู่ในลักษณะเชิงเส้น (Linear-circuit) เช่นในวงจรขยายสัญญาณโอเพอร์เรชันแนลหรือ Op-Amp วงจรขยายสัญญาณผลต่างหรือ Diff Amp วงจรคูณสัญญาณ เป็นต้น ดังนั้นจะเริ่มกล่าวถึงคุณสมบัติของวงจรจ่ายกระแสคงตัวอย่างละเอียดในบทนี้เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะการทำงานของวงจรอย่างแท้จริง

2.3.1) ความหมายของวงจรจ่ายกระแสคงตัว

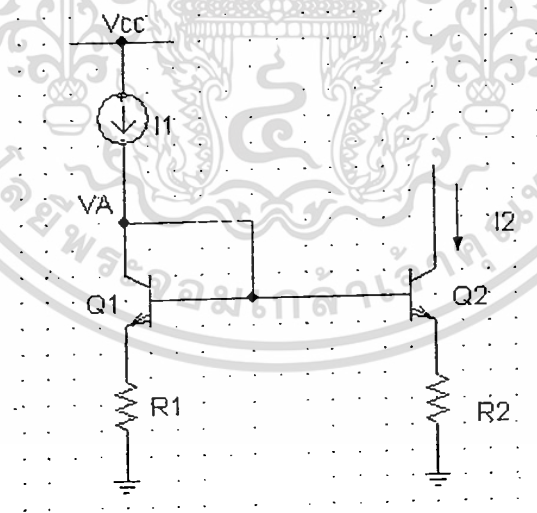
วงจรจ่ายกระแสคงตัวจะทำหน้าที่ควบคุมกระแสที่ไหลผ่านโหลด ให้มีค่าคงตัวตามที่ต้องการเสมอ แม้ว่าค่าโหลดจะเปลี่ยนแปลงก็ตาม โหลดของเราในที่นี้อาจเป็นได้ทั้ง Passive และ Active จากรูปที่ 2.14 (ก) แสดงสัญลักษณ์ของวงจรจ่ายกระแสคงตัวแบบดันกระแสผ่านโหลด (Constant current source) กระแสที่ไหลออกจากวงจรนี้มีค่าคงตัวเสมอ (เท่ากับ I_0) แม้ว่าค่าโหลดเปลี่ยนไป ส่วนรูปที่ 2.14 (ข) แสดงสัญลักษณ์ของวงจรจ่ายกระแสคงตัวแบบดึงกระแสผ่านโหลด (Constant current sink) ซึ่งในกรณีนี้กระแสจะไหลผ่านโหลดก่อนที่จะกลับเข้าสู่วงจรดึงกระแสคงตัว ทิศทางของลูกศรในรูปแสดงถึงทิศทางกระแสของกระแส



รูปที่ 2.14 (ก) แสดงสัญลักษณ์ของวงจรต้นกระแสตัว
(ข) แสดงสัญลักษณ์ของวงจรดึงกระแสตัว

2.3.2) วงจรดึงกระแสที่ใช้ความต้านทานในการไบอัส

จากวงจรจ่ายกระแสตัวจะถูกนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแสในวงจรนี้ โดยจะใช้ความต้านทานที่ต่อกับอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัว ในการปรับอัตราส่วนของกระแสโหลด และกระแสเปรียบเทียบ โดยที่ทรานซิสเตอร์ทั้งสองมีพื้นที่อิมิตเตอร์เท่ากัน ดังเช่นที่แสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงวงจรดึงกระแสที่ใช้ความต้านทานในการปรับอัตราส่วน
กระแส I1 และ I2

ในการพิจารณาต่อไปนี้จะสมมติว่า h_{FE} สำหรับทรานซิสเตอร์ทั้งสองมีค่าสูงมาก ดังนั้น จึงถือว่ากระแสเบสเป็นศูนย์ และ

$$I_1 = I_{C1} = I_{E1} \quad (2.7)$$

$$I_2 = I_{E2} \quad (2.8)$$

ดังนั้น จากรูปเราจะได้

$$V_A = I_1 R_1 + V_{BE1} = I_2 R_2 + V_{BE2} \quad (2.9)$$

และ

$$\Delta V_{BE} = V_{BE2} - V_{BE1} = V_T \ln(I_2 / I_1) \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.9) (2.10) เราจะได้

$$I_2 = I_1 \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \left[1 - \frac{V_T \ln(I_2 / I_1)}{R_1 I_1} \right] \quad (2.11)$$

ซึ่งในกรณีที่ความต่างศักย์รวมความต้านทาน R_1 มีค่ามากกว่า V_T หลายเท่า นั่นคือ

$$R_1 I_1 \gg V_T \quad (2.12)$$

เราจะได้

$$\frac{V_T \ln(I_2 / I_1)}{R_1 I_1} \ll 1 \quad (2.13)$$

และสมการ (2.11) จะได้ค่าประมาณ

$$I_2 \cong I_1 (R_1 / R_2) \quad (2.14)$$

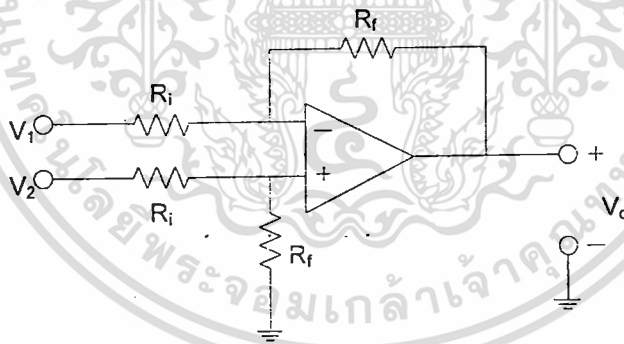
เราจะสังเกตได้ว่าค่าของ I_2 ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความต้านทาน R_1 และ R_2 เท่านั้น ไม่ขึ้นอยู่กับค่าสัมบูรณ์ของความต้านทาน ซึ่งการออกแบบวงจรแบบนี้ นับได้ว่ามีความเหมาะสมอย่างมากสำหรับ IC ทั้งนี้เพราะค่าสัมบูรณ์ของความต้านทาน จะควบคุมให้ถูกต้องได้ยากมาก โดยมากค่าสัมบูรณ์มักจะเปลี่ยนแปลงได้ถึง $\pm 50\%$ แต่อัตราส่วนของความต้านทานสองตัว เราสามารถควบคุมได้ถึง $\pm 5\%$ ซึ่งดีกว่ามาก

2.4) วงจรขยายสัญญาณผลต่าง

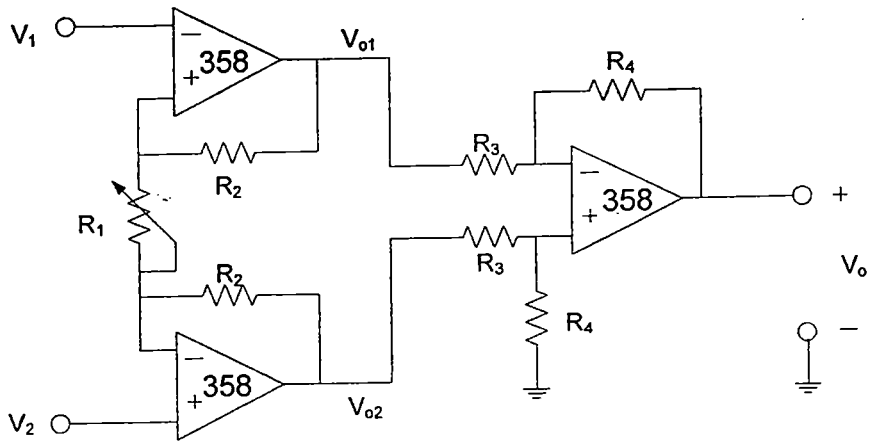
วงจรขยายสัญญาณผลต่างแสดงได้ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งเป็นวงจรขยายสัญญาณอีกชนิดหนึ่งที่ทำให้แรงดันเอาต์พุตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าผลต่างของแรงดันอินพุตสองชุดที่ป้อนให้กับวงจร ซึ่งสามารถเขียนอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_o = \frac{R_f}{R_i} (V_2 - V_1) \quad (2.15)$$

จากสมการ 2.15 พบว่าอัตราขยายแรงดันผลต่างของวงจรเท่ากับอัตราส่วนของ R_f/R_i อย่างไรก็ตาม หากทำการปรับแต่งแรงดันของวงจรโดยการปรับค่า R_f/R_i แล้วจะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานอินพุตของวงจรเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย และเมื่อค่าความต้านทานอินพุตของวงจรเปลี่ยนไปในกรณีที่มีค่าต่ำ ๆ แล้ว ปัญหาเรื่องการโหลดสัญญาณก็จะเกิดตามมาด้วย ซึ่งถือเป็นข้อด้อยประการหนึ่ง ซึ่งในวงจรที่ใช้ในการทดลองจะทำการเพิ่มส่วนวงจรบัฟเฟอร์เป็นวงจรส่วนหน้าก่อนเข้าส่วนของวงจรขยายแสดงได้ดังรูปที่ 2.17 และเรียกวงจรนี้ว่า “วงจรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์”



รูปที่ 2.16 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง



รูปที่ 2.17 วงจรขยายสัญญาณอินสครูเมนต์

จากวงจรในรูปที่ 2.17 พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง V_o กับ $(V_{o1} - V_{o2})$ ที่วงจรขยายสัญญาณผลต่าง โดยอาศัยพื้นฐานจากสมการ 2.15 จะได้

$$V_o = \frac{R_4}{R_3} (V_{o2} - V_{o1}) \quad (2.16)$$

โดยที่ $(V_{o2} - V_{o1}) = I(R_1 + 2R_2) \quad (2.17)$

- และ $I = \frac{V_2 - V_1}{R_1} \quad (2.18)$

ดังนั้น $(V_{o2} - V_{o1}) = \left(\frac{V_2 - V_1}{R_1} \right) (R_1 + 2R_2) \quad (2.19)$

หรือ $(V_{o2} - V_{o1}) = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) (V_2 - V_1) \quad (2.20)$

แทนค่า $(V_{o2} - V_{o1})$ จากสมการ 2.19 ลงในสมการ 2.20 จะได้

$$V_o = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) \left(\frac{R_4}{R_3} \right) (V_2 - V_1) \quad (2.21)$$

นั่นคือ $A_v = \frac{V_o}{(V_2 - V_1)} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) \left(\frac{R_4}{R_3} \right) \quad (2.22)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

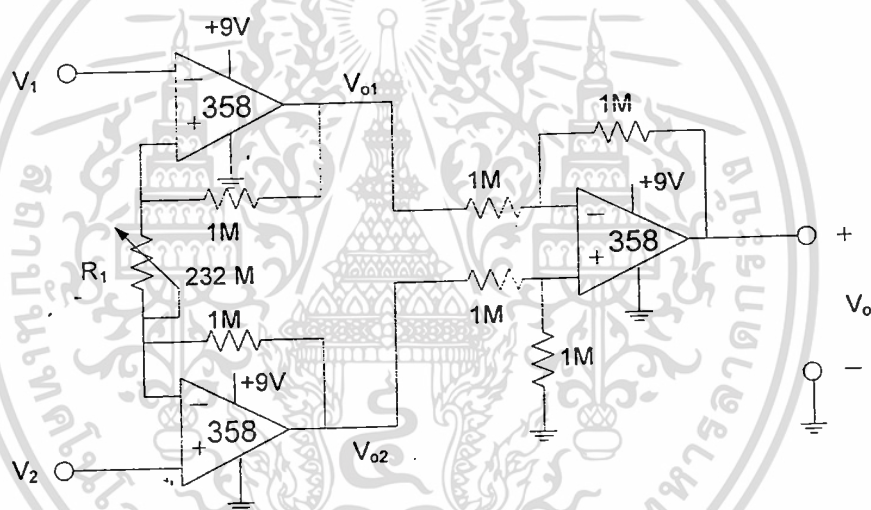
ในการปรับแต่งอัตราขยายแรงดันของวงจรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ทำโดยการเลือกค่า R_2 , R_3 และ R_4 ให้คงที่ แล้วทำการปรับค่า R_1 เพื่อให้ได้อัตราขยายตามที่ต้องการ

อัตราขยายที่ต้องการคือ 10 เท่า เลือกค่าความต้านทาน R_2 , R_3 และ R_4 ให้มีค่าเท่ากันคือ $1\text{ M}\Omega$ และจากสมการที่ 2.22

$$\text{จะได้} \quad 10 = \frac{V_o}{(V_2 - V_1)} = \left(1 + \frac{2 \times 1 \times 10^6}{R_1}\right) \left(\frac{1\text{ M}\Omega}{1\text{ M}\Omega}\right)$$

$$R_1 \cong 232\text{ k}\Omega$$

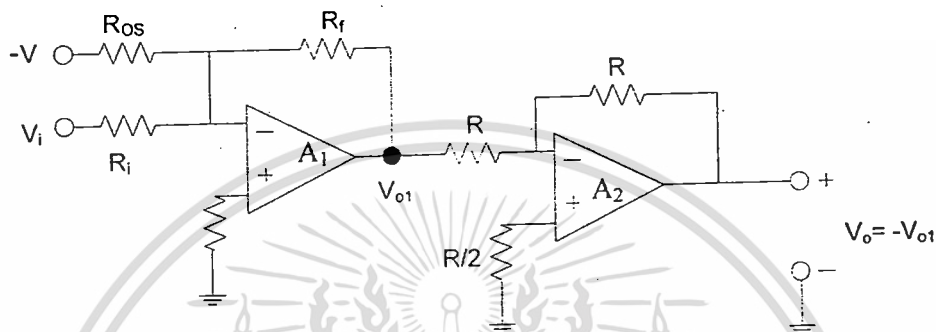
ดังนั้นจะได้วงจรที่ใช้ในการทดลอง แสดงได้ดังรูปที่ 2.18 และสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรขยายจะถูกส่งไปยังวงจรปรับความชันและตำแหน่งศูนย์



รูปที่ 2.18 วงจรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง

2.5) วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์

วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์เป็นวงจรที่มีความสำคัญวงจรหนึ่งในระบบเครื่องมือวัดและคอมพิวเตอร์ โดยทำหน้าที่ส่งผ่าน และปรับแต่งสัญญาณ ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับอินพุตให้มีความสัมพันธ์เป็นไปตามเงื่อนไขที่ระบบต้องการ ซึ่งวงจรนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงความชัน และปรับค่าตำแหน่งศูนย์ ของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 2.19 วงจรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง

วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์และกราฟคุณสมบัติระหว่างแรงดันเอาต์พุต V_o กับแรงดันอินพุต V_i ที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.19 ซึ่งประกอบด้วยวงจรรวมสัญญาณ A_1 และวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส A_2 ที่มีอัตราขยายเท่ากับ -1 ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตของ $A_1(V_{01})$ จึงมีค่าเท่ากับ

$$V_{01} = - \left[\frac{R_f}{R_i} V_i + \frac{R_f}{R_{os}} V \right] \quad (2.22)$$

จากนั้นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จาก A_1 จะถูกป้อนเป็นสัญญาณอินพุตให้กับ A_2 ซึ่งต่อเป็น - วงจรขยายสัญญาณที่มีอัตราขยายเท่ากับ -1 ทำให้แรงดันเอาต์พุตของ $A_2(V_o)$ มีค่าเท่ากับ

$$V_o = V_{o2} = (-1)V_{01} = \left(\frac{R_f}{R_i} V_i + \frac{R_f}{R_{os}} V \right) \quad (2.23)$$

สมการที่ 2.23 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่าง V_o กับ V_i ของวงจรนั้นอยู่ในรูปของสมการเส้นตรงและจากรูปแบบทั่วไปของสมการเส้นตรง

$$y = mx + b \quad (2.24)$$

ดังนั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบสมการ 2.23 กับสมการ 2.24 แล้ว พบว่า

$$m = \frac{R_f}{R_i} \text{ คือ ความชันของกราฟ หรือ อัตราการขยายของวงจร}$$

$$\text{และ } b = \frac{R_f}{R_{os}}(\pm V) \text{ คือ จุดตัดแกน } y \text{ ของกราฟ หรือตำแหน่งศูนย์}$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การปรับค่าความต้านทานสามารถทำการปรับแต่งได้จากค่าความต้านทาน R_f กับ R_i ของวงจร ในขณะที่ตำแหน่งศูนย์ของกราฟความสัมพันธ์จะปรับค่าได้ที่ค่าตัวต้านทาน R_{os} หรือแรงดันอ้างอิง $+V$

โดยจากวงจรที่ใช้ในการทดลองในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ค่าแรงดันเมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์ออกมาแล้วจะมีค่าประมาณ 1.9 – 2.92 V ซึ่งจะนำไปผ่านวงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่มีค่าระหว่าง 0 – 5 V

วิธีการคำนวณเพื่อหาค่าความต้านทานที่ใช้ในวงจรแสดงได้ดังนี้ โดยจากวงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ ความชันที่ต้องการคือ

$$m = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_{o(\max)} - V_{o(\min)}}{V_{i(\max)} - V_{i(\min)}} = \frac{5V - 0V}{2.92V - 1.9V} = 4.9$$

หรือ

$$m = \frac{R_f}{R_i} = 4.9 \text{ โดยเลือก } R_i = 100k\Omega$$

$$\therefore R_f = 490k\Omega$$

จาก $y = mx + b$ หรือสามารถเขียนได้เป็น $V_o = mV_i + b$

$$\text{ดังนั้นที่ } V_i = 1.9V \text{ แล้ว } V_o = 0V$$

$$\text{นั่นคือ } 0 = (4.9) \times (1.9) + b$$

$$b = -9.31V$$

เลือกไฟเลี้ยงเป็น -9 V

จาก
$$b = \frac{R_f}{R_{os}} (\pm V) = -9.31$$

ได้
$$R_{os} = \frac{(490 \times 10^3)(-9)}{-9.31}$$

$$R_{os} \cong 473k\Omega$$

และ

$$R_{COMP} = R_f // R_i // R_{os}$$

$$= 490k\Omega // 100k\Omega // 473k\Omega$$

$$\therefore R_{COMP} \cong 70k\Omega$$

2.6) PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์

PIC คือ microcontroller อีกตระกูลหนึ่ง ย่อมาจากคำว่า Peripheral Interface Controller ซึ่งข้อดีของ microcontroller ตระกูลนี้ก็คือ พยายามรวมเอาการทำงานทุกอย่างเอาไว้ภายในตัว ไม่ว่าจะเป็น PROGRAM MEMORY, RAM, EEPROM, SERIAL, I2C, PWM, A/D ฯลฯ โดยไม่จำเป็นต้องต่ออุปกรณ์เสริมจากภายนอก ในตัวของ PIC จะมีฟังก์ชันที่ใช้ในการประมวลผล รวมทั้งหน่วยความจำ ซึ่งทำให้ PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์นี้สามารถทำงานได้เหมือน CPU ตัวหนึ่ง

2.6.1) PIC Microcontroller ชนิดต่าง ๆ

ไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล PIC ถ้าแบ่งออกตามชนิดของ Program Memory แบ่งได้เป็น 3 แบบคือ

1. OTP (one time programmable)

OTP เป็น chip ที่มีราคาถูกที่สุดในสามประเภท สาเหตุก็มาจากรูปแบบ chip แบบ OTP จะสามารถทำการโปรแกรมได้แค่ครั้งเดียวเท่านั้น หลังจาก chip ได้ถูกโปรแกรมไปแล้วจะไม่สามารถโปรแกรมเข้าไปใหม่ได้อีก ดังนั้น chip ประเภทนี้จะนิยมใช้หลังจากได้พัฒนาโปรแกรมจนกระทั่งจุดบกพร่องต่างๆ ในโปรแกรม ไม่มีอีกแล้ว เพราะจะมีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบตัว memory ประเภทอื่น จะมีตัวอักษร C แสดงบนตัว chip เช่น 16C84, 16C74

2. EPROM (erasable programmable ROM)

EPROM เป็น chip ที่มี program memory ที่เมื่อเขียนโปรแกรมเข้าไปแล้วสามารถโปรแกรมใหม่ด้วยการลบโปรแกรมเดิมโดยให้แสง uV (ultra Violet) ส่องผ่านเข้าไปยัง chip ประมาณ 5-10 นาที ดังนั้นที่ด้านบนของ chip จะมีกรอบกระจกเพื่อให้แสง uV สามารถส่องผ่านเข้าไปในตัว chip ได้ แต่ก็มีจำนวนครั้งในการลบโปรแกรมเช่นกัน เมื่อลบโปรแกรมด้วยแสง uV มากๆ เข้าก็จะเกิดอาการด้าน คือโปรแกรมไม่เข้าแน่นอน จะมีตัวอักษร JW หรือสามารถดูได้จากการมีกรอบกระจกอยู่บน chip หรือไม่

3. EEPROM / Flash (electronically erasable programmable ROM)

EEPROM / Flash เป็น chip ที่ออกมาล่าสุด ส่วนของ program memory สามารถอ่านหรือเขียนด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า ใช้เวลาในการ ลบข้อมูลไม่กินนาที และสามารถลบ และเขียนใหม่ได้หลายพันครั้ง ทำให้เป็นที่นิยมที่สุดใน 3 ประเภท มีตัวอักษร F เป็นตัวบอก เช่น 16F84, 16F877

2.6.2 PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ต่าง ๆ

ปัจจุบันไมโครคอนโทรลเลอร์ ของ PIC มีหลากหลายเบอร์ แต่ในความเป็นจริงแล้ว การออกเบอร์ใหม่ๆ ออกมาได้มีการกำหนดทิศทางที่แน่นอน ซึ่งเราสามารถ จะแบ่งออกเป็น 6 กลุ่มได้แก่

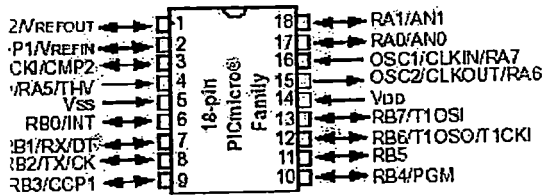
- PIC12CXXX, PIC12FXXX (FLASH MCUs)
- PIC16C5X
- PIC16CXXX
- PIC17CXXX
- PIC16FXXX (FLASH MCUs)
- PIC18CXXX, PIC18FXXX (FLASH MCUs)

PIC16C5X

- มีคำสั่งในภาษา assembly 33 คำสั่ง
- มี I/O, Timer, Watch dog
- มี feature ค่อนข้างน้อย จะไม่มี I2C หรือ SERIAL เพราะเป็น chip ที่ออกมาในยุคแรกๆ

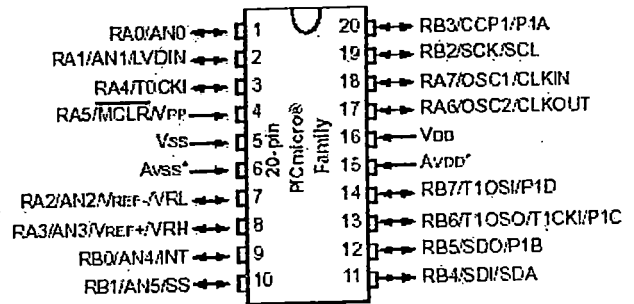
ของ microchip

18-pin PICmicro® MCU Family



A	PIC16CE625	PIC16C710	PIC16F84A
0A	PIC16F627	PIC16C711	PIC16F818
A	PIC16F628	PIC16C712	PIC16F819
A	PIC16F627A	PIC16C715	PIC16F87
3	PIC16F628A	PIC16C716	PIC16F88
4			

20-pin PICmicro® MCU Family



PIC16C717*	PIC16C771	PIC18F1220*
PIC16C770	PIC16C781	PIC18F1320*
	PIC16C782	

*18 pin device: Avss and Avdd are not valid pins for this device

รูปที่ 2.20 PIC16C5X

PIC16CXXX

- มีคำสั่งในภาษา assembly 35 คำสั่ง
- มี I/O, มี Timer มากกว่า 1 ตัว, Watch dog, I2C, USART, SPI, PWM
- เริ่มมี feature มากขึ้น ทำให้การ interface กับอุปกรณ์ภายนอกทำได้ง่ายขึ้น

พบว่ามีความสมบัติเพิ่มขึ้น ทั้ง I2C, USART, PWM ช่วยในการเขียนโปรแกรมได้มากทีเดียว หลังจากนั้นก็ได้ออกตระกูล PIC12CXXX ออกมา ซึ่งเป็น pic ที่มีเพียง 8 ขา เหมาะกับงานเล็กๆ จุดเด่นคือมี OSC ขนาด 4 MHz ภายใน และมี DATA memory ส่วนหนึ่งเป็น EEPROM อยู่ภายใน ด้วย แต่ในส่วนของ PROGRAM memory ยังเป็น OTP และ EPROM อยู่

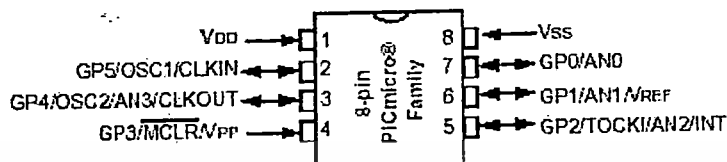
PIC12CXXX และ PIC12FXXX

- มี 8 ขา
- มีคำสั่งในภาษา assembly ทั้งหมด 33 หรือ 35 คำสั่ง
- มี I/O, Timer, Watch dog
- บางเบอร์มี internal EEPROM
- จะมี 4MHz oscillator อยู่ภายในตัว chip เลย ทำให้ไม่ต้องมี oscillator ภายนอก (แต่หากต้องการความแม่นยำของเวลาก็จำเป็นต้องใช้ Crystal oscillator ภายนอก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIC16CXXX และ PIC17CXXX จะออกมาพร้อมๆ กัน แต่ต่างกันที่ว่า PIC17CXXX ถือว่าเป็นเบอร์ที่ใหญ่กว่า มีคำสั่งใน assembly มากกว่า รวมทั้งขนาดของ PROGRAM memory จะมีขนาดมากกว่าในตระกูล PIC16CXXX และสามารถต่อ memory ภายนอกก็ได้

8-pin PICmicro[®] MCU Family



PIC12C508A	PIC12CE519	PIC12CE673
PIC12C509A	PIC12C671	PIC12CE674
PIC12CR509A	PIC12C672	PIC12F629
PIC12CE518		PIC12F675

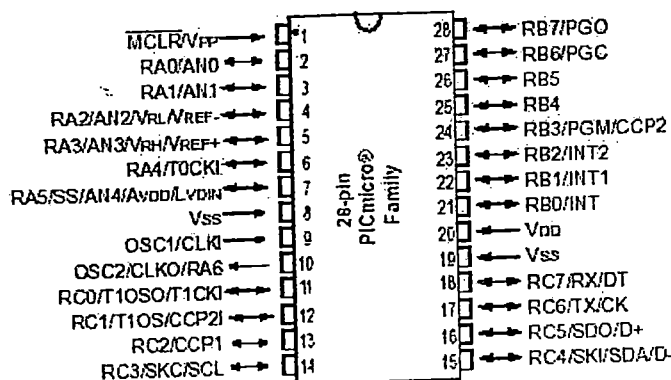
รูปที่ 2.21 PIC12FXXX

PIC17CXXX

- มีคำสั่งในภาษา assembly 58 คำสั่ง มีคำสั่งการ คูณ หาร
- สามารถต่อกับ program memory ภายนอก โดยอ้างได้ถึง 64K x 16 Program memory
- มี I/O, มี Timer มากกว่า 1 ตัว, Watch dog, I2C, USART, SPI, PWM

PIC16F8XXX เป็น PIC ที่ได้รับความนิยมมาก เพราะเป็นชิปชุดแรกๆ ที่มี PROGRAM MEMORY เป็นแบบ FLASH และมี DATA MEMORY ที่เป็น EEPROM เพิ่มเติมเข้ามา รวมทั้งตัว PROGRAM CHIP สามารถสร้างได้ง่าย. ชิปที่ออกมาตอนแรกก็ได้แก่ PIC16F83, PIC16F84 หลังจากก็ได้ออกตระกูล PIC16F87X ซึ่งถือว่าเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่ เพราะมี In Circuit Debugger อยู่ภายในทำให้ ไม่จำเป็นต้องพึ่ง Emulator ที่มีราคาแพงอีกต่อไป ซึ่งเป็นผลให้ CHIP ในตระกูลนี้ และ PIC16F87X นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง

28-pin PICmicro® MCU Family



PIC16C62B	PIC16F76	PIC18C242
PIC16CR63	PIC16C642	PIC18C252
PIC16C63A	PIC16C745	PIC18F2220
PIC16C66	PIC16C773	PIC18F2320
PIC16CR72	PIC16F870	PIC18F2331
PIC16C72A	PIC16F872	PIC18F2431
PIC16F72	PIC16F873	PIC18F242
PIC16C73B	PIC16F873A	PIC18F252
PIC16C76	PIC16F876	PIC18F248
PIC16F73	PIC16F876A	PIC18F258

รูปที่ 2.22 PIC17FXXX

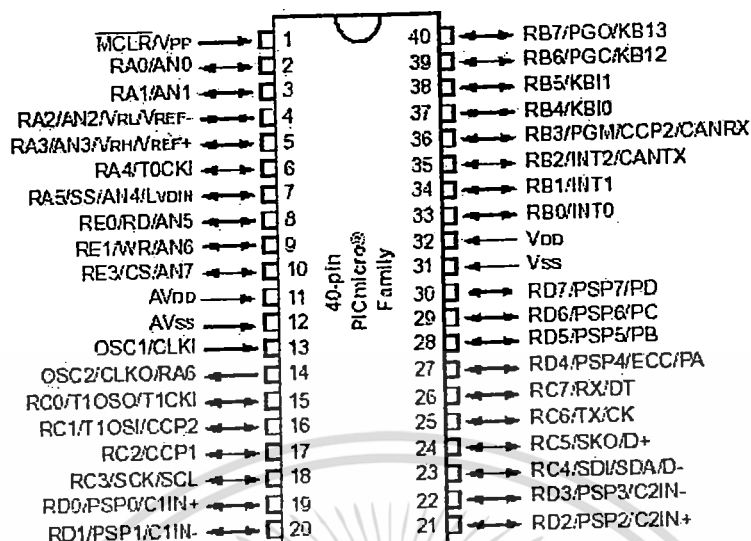
PIC16F8XXX (FLASH MCUs)

- มีคำสั่งในภาษา assembly 35 คำสั่ง
- มี I/O, มี Timer มากกว่า 1 ตัว, Watch dog, I2C, USART, SPI, PWM
- มี A/D ขนาด 10 bits
- มี Program memory เป็นแบบ Flash ทำให้สามารถโปรแกรมใหม่ได้หลายครั้ง
- มี EEPROM ภายใน
- ในตระกูล 16F87X สนับสนุน In Circuit Debugger (ICD) เป็นผลทำให้ไม่จำเป็นต้องซื้อ

Emulator ราคาแพง

จากจุดด้อยของ PIC ก็คือ program memory มีลักษณะเป็น page ทาง Microchip เองก็มองเห็นจุดด้อยตรงนี้จึงได้พัฒนาออกมาเป็น PIC18CXXX ซึ่ง PROGRAM MEMORY ไม่ถูกแบ่งเป็น page อีกต่อไป และเพิ่มคำสั่ง ASSEMBLY เป็น 77 คำสั่ง รวมทั้งออกแบบให้ PROGRAM MEMORY มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อรองรับ การเขียนโปรแกรมภาษา C หลังจากนั้นจึงได้ออก PIC18FXXX ตามมา พร้อมกับ ICD2

40-pin PICmicro[®] MCU Family



PIC16C655	PIC16C765	PIC18F4220
PIC16C65B	PIC16C774	PIC18F4320
PIC16C67	PIC16F871	PIC18F4331
PIC16C662	PIC16F874	PIC18F4431
PIC16C74B	PIC16F874A	PIC18F442
PIC16C77	PIC16F877	PIC18F452
PIC16F74	PIC16F877A	PIC18F448
PIC16F77	PIC18C442	PIC18F458
	PIC18C452	

รูปที่ 2.23 PIC16FXXX

PIC18CXXX, PIC18FXXX (FLASH MCUs)

- มีคำสั่งในภาษา assembly 77 คำสั่ง
- มี I/O, มี Timer มากกว่า 1 ตัว, Watch dog, I2C, USART, SPI, PWM, CAN
- มี A/D ขนาด 10 bits
- สามารถต่อกับ program memory ภายนอก โดยอ้างได้ถึง 64K x 16 Program memory
- มี Program memroy เป็นแบบ Flash ทำให้สามารถโปรแกรมใหม่ได้หลายครั้ง
- ในตระกูล 18FXXX มี EEPROM ภายใน
- ในตระกูล 18FXXX สนับสนุน In Circuit Debugging (ICD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 โครงสร้างของ 16F876A PIC Microcontroller

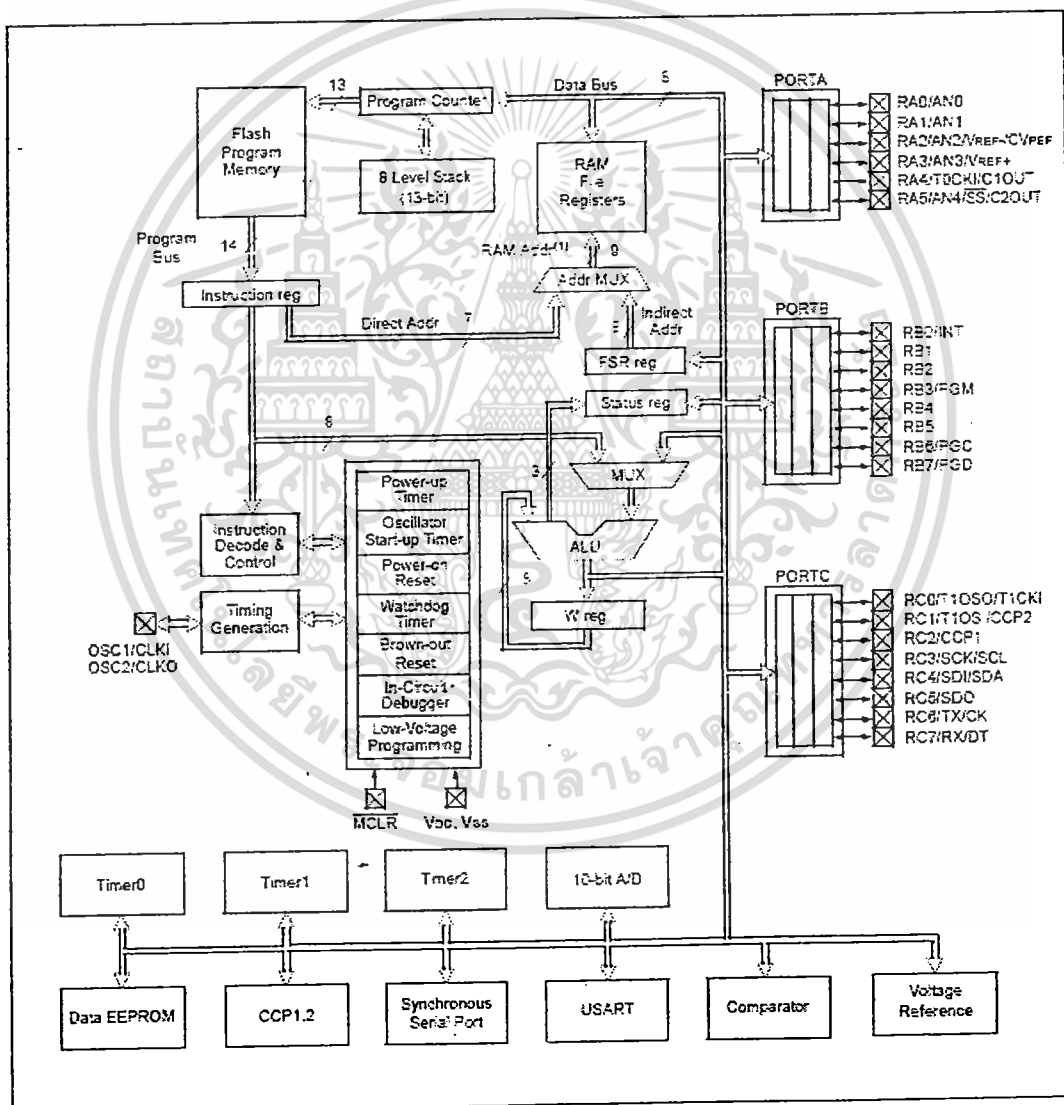
2.6.3.1 คุณสมบัติของ PIC16F876A

สำหรับในปริิณยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ 16F876A ในการทำการทดลอง ดังนั้นจะขอกล่าวถึงเพียงแบบเดียว โดยคุณสมบัติที่สำคัญของ PIC เบอร์นี้ มีดังนี้

- ซีพียูเป็นแบบ RISC (Reduced Instruction Set) มีคำสั่งให้ใช้งาน 35 คำสั่ง
- คำสั่งหนึ่ง ๆ ใช้เวลาทำงาน 1 ถึง 2 Cycle
- ทำงานได้สูงสุดที่ 20 MHz
- สัญญาณนาฬิกา มีหลายโหมดให้เลือกใช้งาน
 - โหมด RC ใช้วงจรภายในไมโครคอนโทรลเลอร์กำเนิดสัญญาณนาฬิกา
 - โหมด LP ใช้คริสตัลพลังงานต่ำ ความถี่สูงสุดไม่เกิน 200 KHz
 - โหมด XT ใช้คริสตัลความถี่ตั้งแต่ 100 KHz – 4 Mhz
 - โหมด HS ใช้คริสตัลความถี่สูง สูงสุดไม่เกิน 20 Mhz
- มี I/O พอร์ตทั้งหมด 3 พอร์ต [PORT A (6 bits), PORT B (8 bits), PORT C (8 bits)]
- มีหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบ Flash มีขนาด 8KWord (1 word=14 bits)
- มี RAM ขนาด 368 bytes
- มี EEPROM ขนาด 256 bytes
- ทำงานแบบ Pipe-line ทำให้ ณ เวลาหนึ่งสามารถทำคำสั่ง Fetch และ Execute ได้พร้อมกัน
- ตอบสนองกับอินเทอร์รัพต์ได้ 14 แหล่ง
- มี Stack ให้ใช้ได้สูงสุด 8 ระดับ
- มีระบบ POR (Power On Reset), PWRT (Power Up Timer), OST(Oscillator Start-up timer).
- มีระบบ WDT (Watchdog Timer)
- มีระบบ CP (Code Protection) และสามารถเลือกกระดับการป้องกันได้
- มีโหมดประหยัดพลังงาน
- สามารถโปรแกรมด้วยไฟ +5 VDC ได้
- สามารถโปรแกรมแบบ In-Circuit Serial Programming

- ทำงานที่ไฟเลี้ยง 2 VDC ถึง 5.5 VDC
- Current Sink และ Current Source ของ PORT อยู่ที่ 25 mA
- มี Timer/Counter 3 ตัว
- มีโมดูล Capture/Compare/PWM 2 ชุด
- มี A/D Converter แบบ 10 บิต จำนวน 8 ช่องนำเข้าไปในตัว
- มีระบบ USART สำหรับการสื่อสารแบบอนุกรม
- มีระบบตรวจระดับไฟเลี้ยง BODEN (Brown-Out Detection) เพื่อสร้างสัญญาณรีเซตซีพียู BOR (Brown-Out Reset)

2.6.3.2 โครงสร้างการทำงานภายในของ PIC16F876A



รูปที่ 2.24 แผนผังการทำงานของ PIC 16F876A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อขา	ตำแหน่งขา	ชนิด ของขา	ชนิดของ วงจร บัฟเฟอร์	รายละเอียด
OSC1/CLKI OSC1 CLKI	9	I I	ST/CMOS ⁽³⁾	Oscillator crystal or external clock input. Oscillator crystal input or external clock source input. ST buffer when configured in RC mode; otherwise CMOS. External clock source input. Always associated with pin function OSC1 (see OSC1/CLKI, OSC2/CLKO pins).
OSC2/CLKO OSC2 CLKO	10	O O	—	Oscillator crystal or clock output. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. In RC mode, OSC2 pin outputs CLKO, which has 1/4 the frequency of OSC1 and denotes the instruction cycle rate.
MCLR/Vpp MCLR Vpp	1	I P	ST	Master Clear (input) or programming voltage (output). Master Clear (Reset) input. This pin is an active low Reset to the device. Programming voltage input.
RA0/AN0 RA0 AN0 RA1/AN1 RA1 AN1 RA2/AN2/VREF- CVREF RA2 AN2 VREF- CVREF RA3/AN3/VREF+ RA3 AN3 VREF+ RA4/T0CKI/C1OUT RA4 T0CKI C1OUT RA5/AN4/SS/C2OUT RA5 AN4 SS C2OUT	2 3 4 5 6 7	I/O I I/O I I/O I I O I/O I I I O I/O I I I O	TTL TTL TTL TTL ST TTL	PORTA is a bidirectional I/O port. Digital I/O. Analog input 0. Digital I/O. Analog input 1. Digital I/O. Analog input 2. A/D reference voltage (Low) input. Comparator VREF output. Digital I/O. Analog input 3. A/D reference voltage (High) input. Digital I/O – Open-drain when configured as output. Timer0 external clock input. Comparator 1 output. Digital I/O. Analog input 4. SPI slave select input. Comparator 2 output.
RB0/INT RB0 INT RB1 RB2 RB3/PGM RB3 PGM	21 22 23 24	I/O I I/O I/O I/O I	TTL/ST ⁽¹⁾ TTL TTL TTL	PORTB is a bidirectional I/O port. PORTB can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs. Digital I/O. External interrupt. Digital I/O. Digital I/O. Digital I/O. Low-voltage (single-supply) ICSP programming enable pin.

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของขา PIC 16F876A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อขา	ตำแหน่งขา	ชนิดของขา	ชนิดของวงจรบัฟเฟอร์	รายละเอียด
RB4	25	I/O	TTL	Digital I/O.
RB5	26	I/O	TTL	Digital I/O.
RB6/PGC	27	I/O	TTL/ST ⁽²⁾	Digital I/O.
RB6		I		In-circuit debugger and ICSP programming clock.
PGC				
RB7/PGD	28	I/O	TTL/ST ⁽²⁾	Digital I/O.
RB7		I/O		In-circuit debugger and ICSP programming data.
PGD				
RC0/T1OSO/T1CKI	11	I/O	ST	PORTC is a bidirectional I/O port. Digital I/O.
RC0		O		Timer1 oscillator output.
T1OSO		I		Timer1 external clock input.
T1CKI				
RC1/T1OSI/CCP2	12	I/O	ST	Digital I/O.
RC1		I		Timer1 oscillator input.
T1OSI		I/O		Capture2 input, Compare2 output, PWM2 output.
CCP2				
RC2/CCP1	13	I/O	ST	Digital I/O.
RC2		I/O		Capture1 input, Compare1 output, PWM1 output.
CCP1				
RC3/SCK/SCL	14	I/O	ST	Digital I/O.
RC3		I/O		Synchronous serial clock input/output for SPI mode.
SCK		I/O		Synchronous serial clock input/output for I ² C mode.
SCL				
RC4/SDI/SDA	15	I/O	ST	Digital I/O.
RC4		I		SPI data in.
SDI		I/O		I ² C data I/O.
SDA				
RC5/SDO	16	I/O	ST	Digital I/O.
RC5		I/O		SPI data out.
SDO		O		
RC6/TX/CK	17	I/O	ST	Digital I/O.
RC6		O		USART asynchronous transmit.
TX		I/O		USART1 synchronous clock.
CK				
RC7/RX/DT	18	I/O	ST	Digital I/O.
RC7		I		USART asynchronous receive.
RX		I/O		USART synchronous data.
DT				
Vss	8, 19	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
Vdd	20	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.

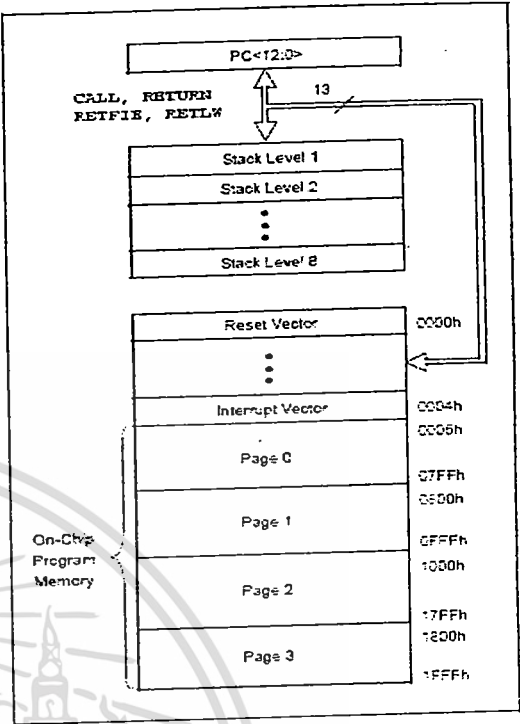
ตารางที่ 2.1 (ต่อ) รายละเอียดของขา PIC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3.3 การจัดสรรหน่วยความจำโปรแกรมของ PIC16F876A

PIC16F876A จะมีขนาดของ Program Memory ซึ่งสามารถอ้างได้ถึง 8K byte โดย PIC16F876A จะมีขนาดหน่วยความจำเท่ากับ 8 K x 14 bits ซึ่งตำแหน่ง Reset Vector จะอยู่ที่ 0004h

PIC จะแบ่ง Program Memory ออกเป็น Page ซึ่งแต่ละ Page ก็จะมีขนาด 2 Kbytes ซึ่งคำสั่ง CALL และ GOTO สามารถสั่งให้ Program Counter กระโดดไปมาได้ ในช่วง Page เท่านั้น แต่ถ้าเมื่อต้องการกระโดดจาก Page ไปยังอีก Page หนึ่ง ต้องไปควบคุม PCLATH<4:3> (Bit Address ที่ 12 และ 13) ให้ชี้ไปยัง Page ที่ต้องการเสียก่อน หลังจากนั้นจึงเรียกคำสั่ง CALL หรือ GOTO ตามอีกที



รูปที่ 2.25 การจัดสรรหน่วยความจำโปรแกรมของ PIC 16F876A

การเลือก Page ของหน่วยความจำโปรแกรม จะต้องเลือกกรีจิสเตอร์ PCLATH โดยการระบุตำแหน่งที่บิต 3 และบิต 4

PCLATH<4:3>	Page
00	0
01	1
10	2
11	3

ตารางที่ 2.2 ค่า PCLATH<4:3> ในการเลือก Page ของ 16F876A

เมื่อใช้คำสั่ง CALL ไปที่ Routine ใด Routine หนึ่งแล้ว จะใช้คำสั่ง RETURN ในการกลับไปตำแหน่งเดิม การ RETURN กลับนั้นไม่จำเป็นต้องสั่ง PCLATH ให้ชี้ไปยัง Page ก่อน

หน้าที่จะเรียก CALL เพราะค่า Address ดังกล่าวจะถูกเก็บไว้ใน STACK อยู่แล้ว แต่สำหรับคำสั่ง GOTO เวลาข้าม Page จะต้องสั่งให้ PCLATH ชี้ไปยัง Page ที่ต้องการทุกครั้ง

2.6.3.4 การจัดสรรหน่วยความจำข้อมูล RAM ของ PIC16F876A

PIC16F876A มีหน่วยความจำข้อมูล RAM สำหรับใช้งานทั่วไป 386 bytes และมีรีจิสเตอร์ไฟล์ 8 bits 57 ตัว ดังรูปที่ 2.25 แต่ละ Bank มีขนาดสูงสุด 128 bytes แต่มีการใช้งานได้จริงในแต่ละ Bank ต่างกัน โดยในแต่ละ Bank มีการจัดสรรพื้นที่ดังนี้

- Bank 0 มีช่วง Address 0x00-0x7F

Address 0x00-0x1F เป็นพื้นที่รีจิสเตอร์ไฟล์

Address 0x20-0x7F เป็นพื้นที่ของหน่วยความจำข้อมูลสำหรับใช้งานทั่วไป 96 bytes

- Bank 1 มีช่วง Address 0x80-0xFF

Address 0x80-0x9F เป็นพื้นที่ของรีจิสเตอร์ไฟล์ แต่มีบาง Address ไม่ใช้งาน

Address 0xA0-0xEF เป็นพื้นที่ของหน่วยความจำข้อมูลสำหรับใช้งานทั่วไป 80 bytes

Address 0xF0-0xFF บรรจุข้อมูลเหมือนกับใน Address 0x70-0x7F ใน Bank 0 เพื่อช่วยให้สามารถใช้ข้อมูลจาก Address 0x70-0x7F ได้ง่ายขึ้น โดยไม่ต้องเปลี่ยน Bank

- Bank 2 มีช่วง Address 0x100-0x17F

-Address 0x100-0x10F เป็นพื้นที่ของรีจิสเตอร์ไฟล์ แต่มีบาง Address ไม่ใช้งาน

-Address 0x110-0x11F เป็นพื้นที่ของหน่วยความจำข้อมูลสำหรับใช้งานทั่วไป 16 bytes

-Address 0x120-0x16F เป็นพื้นที่ของหน่วยความจำข้อมูลสำหรับใช้งานทั่วไป 80 bytes

-Address 0x170-0x17F บรรจุข้อมูลเหมือนกับใน Address 0x70-0x7F ใน Bank 0 เพื่อช่วยให้สามารถใช้ข้อมูลจาก Address 0x70-0x7F ได้ง่ายขึ้น โดยไม่ต้องเปลี่ยน Bank

- Bank 3 มีช่วง Address 0x180-0x1FF

Address 0x180-0x18F เป็นพื้นที่ของรีจิสเตอร์ไฟล์ แต่มีบาง Address ไม่ใช้งาน

- Address 0x190-0x19F เป็นพื้นที่ของหน่วยความจำข้อมูลสำหรับใช้งานทั่วไป 16 bytes
- Address 0x1A0-0x1EF เป็นพื้นที่ของหน่วยความจำข้อมูลสำหรับใช้งานทั่วไป 80 bytes
- Address 0x1F0-0x1FF บรรจุข้อมูลเหมือนกับใน Address 0x70-0x76F ใน Bank 0 เพื่อช่วยให้สามารถใช้ข้อมูลจาก 0x70-0x76F ได้ง่ายขึ้น โดยไม่ต้องเปลี่ยน Bank

การเลือก Bank ของหน่วยความจำข้อมูล RAM จะต้องเลือกกรีตเตอร์ STATUS โดยการระบุตำแหน่งที่บิต 5 และบิต 6 (RP0,RP1)

RP1:RP0	Bank
00	0
01	1
10	2
11	3

ตารางที่ 2.3 ค่า RP0 และ RP1 ในการเลือก Bank ของ 16F876A

File Address	File Address	File Address	File Address
Indirect addr. ⁽¹⁾ 00h	Indirect addr. ⁽¹⁾ 80h	Indirect addr. ⁽¹⁾ 100h	Indirect addr. ⁽¹⁾ 180h
TMR0 01h	OPTION_REG 81h	TMR0 101h	OPTION_REG 181h
PCL 02h	PCL 82h	PCL 102h	PCL 182h
STATUS 03h	STATUS 83h	STATUS 103h	STATUS 183h
FSR 04h	FSR 84h	FSR 104h	FSR 184h
PORTA 05h	TRISA 85h		
PORTB 06h	TRISB 86h	PORTB 105h	TRISB 186h
PORTC 07h	TRISC 87h		
PORTD ⁽¹⁾ 08h	TRISD ⁽¹⁾ 88h		
PORTF ⁽¹⁾ 09h	TRISE ⁽¹⁾ 89h		
PCLATH 0Ah	PCLATH 8Ah	PCLATH 109h	PCLATH 18Ah
INTCON 0Bh	INTCON 8Bh	INTCON 10Ah	INTCON 18Bh
PIR1 0Ch	PIE1 8Ch	EEDATA 10Bh	EECON1 18Ch
PIR2 0Dh	PIE2 8Dh	EEADR 10Ch	EECON2 18Dh
TMR1L 0Eh	PCON 8Eh	EEDATH 10Dh	Reserved ⁽²⁾ 18Eh
TMR1H 0Fh		EEADRH 10Eh	Reserved ⁽²⁾ 18Fh
T1CON 10h			
TMR2 11h	SSPCON2 8Fh		
T2CON 12h	PR2 90h		
SSPEUF 13h	SSPAD0 91h		
SSPCON 14h	SSPSTAT 92h		
CCPR1L 15h			
CCPR1H 16h			
CCP1CON 17h		General Purpose Register 10Fh	General Purpose Register 18Fh
RSTA 18h	TXSTA 93h		
TXREG 19h	SPBRG 94h		
RCREG 1Ah			
CCPR2L 1Bh			
CCPR2H 1Ch	CMCON 95h		
CCP2CON 1Dh	CVRCON 96h		
ADRESH 1Eh	ADRESL 97h		
ADCON0 1Fh	ADCON1 98h		
General Purpose Register 60 Bytes	General Purpose Register 80 Bytes	General Purpose Register 80 Bytes	General Purpose Register 80 Bytes
	accesses 70h-7Fh	accesses 70h-7Fh	accesses 70h-7Fh
Bank 0 7Fh	Bank 1 FFh	Bank 2 17Fh	Bank 3 1FFh

☐ Unimplemented data memory locations, read as '0'.
☐ Not a physical register.

Note 1: These registers are not implemented on the PIC16F876A.
 Note 2: These registers are reserved; maintain these registers clear.

รูปที่ 2.26 การจัดสรรหน่วยความจำข้อมูล RAM และตำแหน่งรีจิสเตอร์ของ PIC 16F876A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3.5 รีจิสเตอร์หลักของ PIC16F876A

รีจิสเตอร์ Configuration word

มีขนาด 14 bits อยู่ที่ Address 2007h ใน Program Memory โดยการทำงานของเบื้องต้นของ PIC จะถูกกำหนดที่หน่วยความจำตรงนี้ ไม่ว่าจะเป็น Enable/Disable Power-up timer Enable/Disable Watchdog timer, Oscillator Selection bits (กำหนดที่มาของสัญญาณนาฬิกา) หน่วยความจำที่ตำแหน่งนี้ จะต้องกำหนดในขณะที่ทำการเขียนโปรแกรมลงสู่ Flash Memory ของ PIC

รีจิสเตอร์ STATUS

เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้เก็บข้อมูลแสดงสถานะการทำงานของ PIC 16F876A

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R-1	R-1	R/W-x	R/W-x	R/W-x
IRP	RP1	RP0	TO	PD	Z	DC	C
bit 7							bit 0

รูปที่ 2.27 รีจิสเตอร์ STATUS

บิต 7 **IRP** (Indirect Register Bank Select bit) ใช้เลือก Bank ของหน่วยความจำข้อมูล

RAM เมื่อใช้การอ้างตำแหน่งโดยอ้อม

1 = Bank 2,3 (100h-1FFh)

0 = Bank 0,1 (00h-FFh)

บิต 6-5 **RP1:RP0** (Register Bank Selection bits) ใช้เลือก Bank ของหน่วยความจำ

ข้อมูล RAM เมื่อใช้การอ้างตำแหน่งโดยตรง

11 = Bank 3 (180h-1FFh)

10 = Bank 2 (100h-17Fh)

01 = Bank 1 (80h-FFh)

00 = Bank 0 (00h-7Fh)

บิต 4 **TO** (Time-out bit) บิตแสดงการเกิด Time Out เมื่อ Watchdog Timer ทำงาน

ครบเวลาที่กำหนด

1 = After power-up, CLRWDT instruction, or SLEEP instruction

0 = A WDT time-out occurred

บิต 3 **PD** (Power-down bit) บิตแสดงการทำงานโหมดประหยัดพลังงาน

1 = After power-up or by the CLRWDT instruction

0 = By execution of the SLEEP instruction

- บิต 2 Z (Zero bit)** ใช้แสดงผลการกระทำคำสั่งทางคณิตศาสตร์
- 1 = The result of an arithmetic or logic operation is zero
- 0 = The result of an arithmetic or logic operation is not zero
- บิต 1 DC (Digit carry/borrow bit)** ใช้แสดงการทดหรือยืมระหว่างหลักในกรณีคำสั่ง ADDWF หรือ ADDLW
- 1 = A carry-out from the 4th low order bit of the result occurred
- 0 = No carry-out from the 4th low order bit of the result
- และแสดงค่ากลับกันเมื่อกระทำคำสั่ง SUBWF หรือ SUBLW
- บิต 0 C (Carry/borrow bit)** ใช้แสดงการทดหรือยืมของบิต MSB ในกรณีคำสั่ง ADDWF หรือ ADDLW
- 1 = A carry-out from the Most Significant bit of the result occurred
- 0 = No carry-out from the Most Significant bit of the result occurred
- และแสดงค่ากลับกันเมื่อกระทำคำสั่ง SUBWF หรือ SUBLW

Program counter (PC) เป็นรีจิสเตอร์พิเศษใช้ระบุ Address ของ Program Memory ที่กำลังทำการประมวลผล ซึ่งจะเป็น Counter ขนาด 13 bits โดยทั่วไปแล้ว Counter ตัวนี้จะเพิ่มขึ้น 1 ทุก ๆ ครั้ง เมื่อมีการประมวลผลคำสั่งเกิดขึ้น 1 ครั้ง ซึ่งค่าที่แสดงก็คือตำแหน่งของคำสั่งต่อไปที่จะทำการประมวลผล แต่เมื่อประมวลคำสั่ง JUMP ตัว Counter จะมีค่าเท่ากับตำแหน่งที่คำสั่ง JUMP นั้นอ้างถึง

Stack เป็นหน่วยความจำสำรองสำหรับเก็บค่าของ OC ขนาด 13 bits โดยเก็บข้อมูลได้ 8 ระดับ โดยเก็บตำแหน่งของ PC เข้าเมื่อมีคำสั่ง CALL และส่งค่าตำแหน่งที่เก็บไว้ออกไปยัง PC เมื่อมีคำสั่ง RETURN โดยการเก็บจะเป็นแบบ LIFO (Last In First Out)

PORTA, PORTB, ... เก็บค่าสถานะของ PORT นั้น ๆ

TRISA, TRIB, ... ใช้กำหนดทิศทางของขาของ PORT นั้น ๆ ว่าขาใดเป็น Input หรือ Output โดยถ้ากำหนดให้เป็น 0 จะเป็น Output ถ้าให้เป็น 1 จะเป็น Input

บทที่ 3

กระบวนการสร้างไดโอดชนิดรอยต่อ พี-เอ็น

การสร้างไดโอดชนิดพี-เอ็น สามารถสร้างได้จากเทคโนโลยีวงจรรวมซึ่งมีอยู่หลายระดับ โดยในแต่ละระดับจะมีกระบวนการสร้างมาตรฐานที่คล้ายคลึงกัน และในที่นี้จะใช้กระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อนและส่วนข้อสัมผัสเป็นโลหะอลูมิเนียม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการสร้างไดโอดชนิด พี-เอ็น

แบ่งได้เป็นขั้นตอนย่อยๆ ได้ดังนี้

(1) แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น (initial wafer)

- แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ระบาย(111)
- ค่าพิคัดความต้านทาน 1-2 Ω -cm
- ขนาดความหนาของแผ่นผลึกประมาณ 400 μ m



รูปที่ 3.1

(2) การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิกอนครั้งแรก

การทำความสะอาดผิวหน้าเป็นการล้างสิ่งเจือปน สารแขวนลอย คราบไขมัน รวมทั้งซิลิกอนไดออกไซด์ที่ผิวซึ่งเป็นโลหะหนัก เพื่อให้แผ่นซิลิกอนสะอาดและพร้อมที่จะนำไปใช้งาน โดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

2.1) กำจัดฝุ่น

- Ultrasonic ในน้ำบริสุทธิ์ (Deionization) 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

2.2) กำจัดเศษโลหะ

- ดมในกรดไนตริก (HNO_3) 2 แก้วละ 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- ดมในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ดมในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที

- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์

- เป่าให้แห้งด้วย N_2

2.3) กำจัดไขมัน

- ต้มใน Trichloroethylene 5 นาที

- Ultrasonic ใน Acetone 3 นาที

- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง

- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง

- เป่าให้แห้งด้วย N_2

(3) การ Slight etching

- จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 วินาที

- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง

- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง

- เป่าให้แห้งด้วย N_2

(4) กระบวนการออกซิเดชันครั้งที่ 1

การสร้างออกไซด์ในขั้นตอนนี้เป็นส่วนป้องกันในการแพร่สารเจือด้วยความหนาของชั้นออกไซด์มีค่า 5000 Å ซึ่งจะมีรายละเอียดดังนี้

- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200cc/min 1 ชั่วโมง ใช้อุณหภูมิเตา 1000 °C

- Wet Oxidation ด้วย O_2 1000cc/min 1 ชั่วโมง ใช้อุณหภูมิเตา 1000 °C

- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200cc/min 1 ชั่วโมง ใช้อุณหภูมิเตา 1000 °C



รูปที่ 3.2

(5) กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์กที่ 1

การใช้มาส์กที่ 1 เป็นต้นแบบในการเปิดช่องชั้นออกไซด์เพื่อไปสู่ขั้นตอนในการแพร่สารเจือต่อไป

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 85 - 90°C 30 นาที

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (Way coat) spin 3000 rpm

- อบฟิล์มที่ 90 °C 20 นาที (Prebake)

- Alignment Expose (UV 10 วินาที)

- Develop ฟิล์ม โดย

จุ่มใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที

จุ่มใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที

จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที

จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สอง 30 วินาที

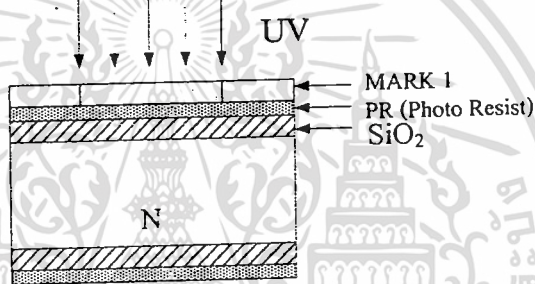
จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สาม 30 วินาที

จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 1

จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 2

เป่าให้แห้งด้วย N_2

-อบฟิล์มที่ $90^\circ C$ 20 นาที (Postbake)



รูปที่ 3.3

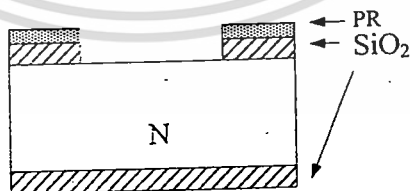
(6) การใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

-จุ่มในสารละลาย Buffer 5 นาที อัตราการ Etching $1000\text{\AA}/\text{นาที}$

-จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 1

-จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 2

-เป่าให้แห้งด้วย N_2

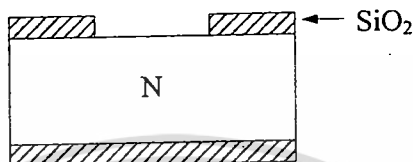


รูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(7) กระบวนการลอกฟิล์ม

- ต้มในกรด Sulfuric (H_2SO_4) 2 แก้วๆ ละ 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ 1 แก้ว จนสะอาด
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว จนสะอาด
- เป่าให้แห้งด้วย N_2



รูปที่ 3.5

(8) การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Trichloroethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 2 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

(9) การ Slight Etching

- จุ่มในสารละลาย HF 5% 10-20 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

(10) กระบวนการ Pre-deposition

- Boron deposition Temp $1000^\circ C$ 20 นาที
- Flow N_2 1000 cc/min

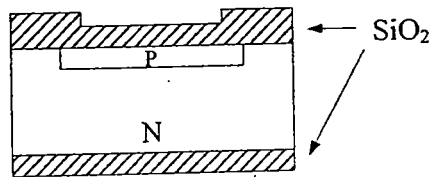
(11) ลอกชั้น Boron glass

- จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

(12) กระบวนการ Drive-in

-Boron drive-in Temp 1000 °C

-Dry O₂ 1200 cc/min ที่เวลา 40 นาที



รูปที่ 3.6

(13) กระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 2

การที่ใช้มาส์ค ที่ 2 เพื่อเป็นต้นแบบในการเปิดออกไซด์บริเวณขั้วสัมผัส

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 85 - 90°C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ) spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่ 90 °C 20 นาที (Prebake)
- Alignment Expose (UV 10 วินาที)
- Develop ฟิล์ม โดย

จุ่มใน AZ Developer แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที

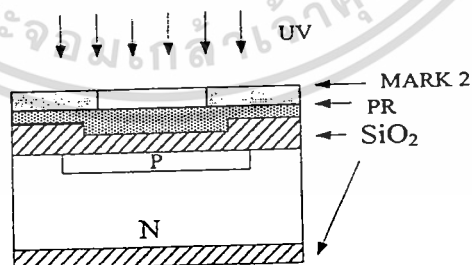
จุ่มใน AZ Developer แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที

จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 1

จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 2

เป่าให้แห้งด้วย N₂

- อบฟิล์มที่ 90 °C 20 นาที (Postbake)

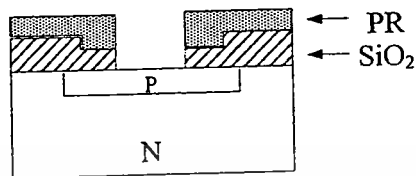


รูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(14) การใช้สารละลายกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มในสารละลาย Buffer
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 2
- เป่าให้แห้งด้วย N_2



รูปที่ 3.8

(15) กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มใน Acetone 2 แก้วๆ ละ 1 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว จนสะอาด
- เป่าให้แห้งด้วย N_2



รูปที่ 3.9

(16) การทำความสะอาดผิวหน้า

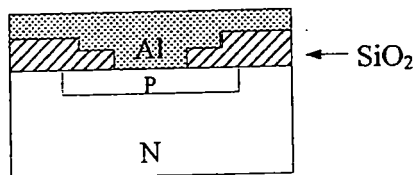
- ดั้มใน Trichloroethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 2 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

(17) การ Slight Etching

- จุ่มในสารละลาย HF 5% 10-20 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

(18) การเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศ

โดยกระบวนการ Thermal Evaporation ที่ความดัน 3×10^{-6} Torr ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วย อะลูมิเนียม

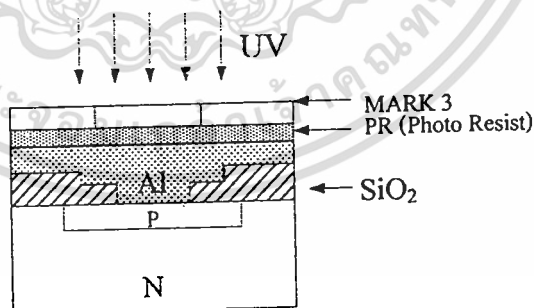


รูปที่ 3.10

(19) กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 3

การใช้มาส์คที่ 3 เพื่อเป็นต้นแบบในการสร้างขั้วโลหะ

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ $85 - 90^{\circ}\text{C}$ 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ) spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่ 90°C 20 นาที (Prebake)
- Alignment Expose (UV 10 วินาที)
- Develop ฟิล์ม โดย
 - จุ่มใน AZ Developer แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
 - จุ่มใน AZ Developer แก้วที่สอง 30 วินาที
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 1
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 2
 - เป่าให้แห้งด้วย N_2
- อบฟิล์มที่ 90°C 20 นาที (Postbake)

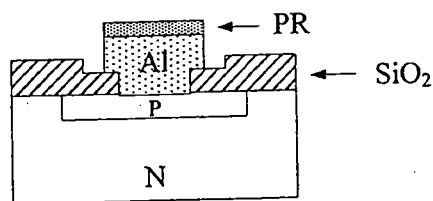


รูปที่ 3.11

(20) การสกัดชั้นอะลูมิเนียม (Al- Etching)

- จุ่มในสารละลาย Al-Etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40°C
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 1

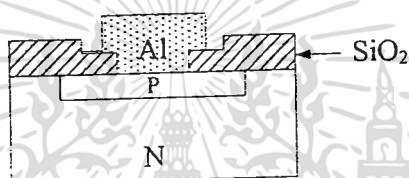
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 2
- เป่าให้แห้งด้วย N_2



รูปที่ 3.12

(21) กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มใน Acetone 2 แก้วๆ ละ 1 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว จนสะอาด
- เป่าให้แห้งด้วย N_2



รูปที่ 3.13

(22) กระบวนการ Sintering Temp 500°C

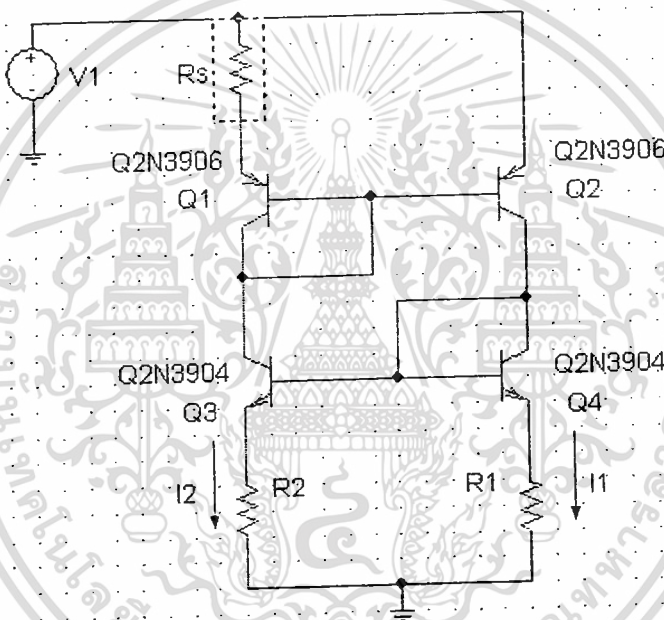
- Dry N_2 1000 cc/min 12 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

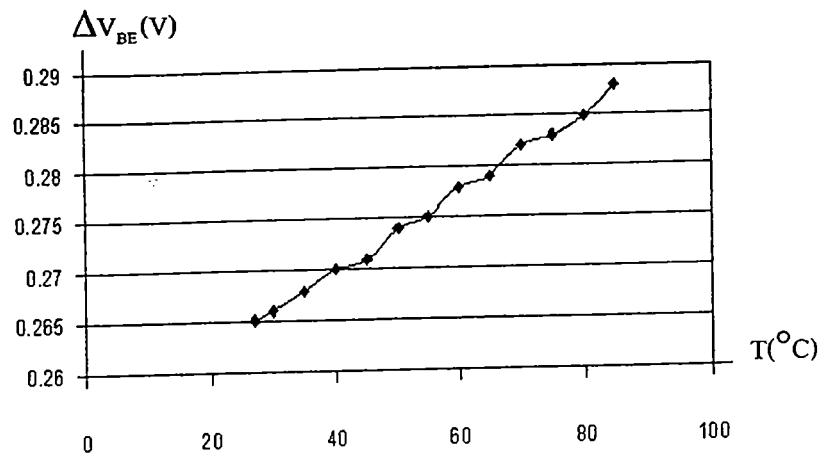
ผลการทดลอง

ในขั้นตอนแรก ต้องศึกษาในส่วนของวงจรแหล่งจ่ายกระแสคงที่โดยการต่อวงจรดังรูปที่ 4.1 ซึ่งกำหนดให้กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ทั้งสองนี้จะมีค่าไม่เท่ากัน โดยใช้ค่าความต้านทานเป็นตัวกำหนดค่ากระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ให้มีจำนวนเท่าที่แตกต่างกันเป็น 5 เท่า และ 10 เท่า ตามลำดับ จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ทรานซิสเตอร์(Q3,Q4) ที่อุณหภูมิระหว่าง $27^{\circ}\text{--}85^{\circ}\text{C}$ โดยการใส่เข้าไปในเตาอบความร้อน แล้ววัดค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ซึ่งจากคุณสมบัติพื้นฐานของรอยต่อพี-เอ็นพบว่า เมื่อรอยต่อพี-เอ็นได้รับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.1 แสดงวงจรแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ใช้ค่าความต้านทานเป็นตัวกำหนดค่ากระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์

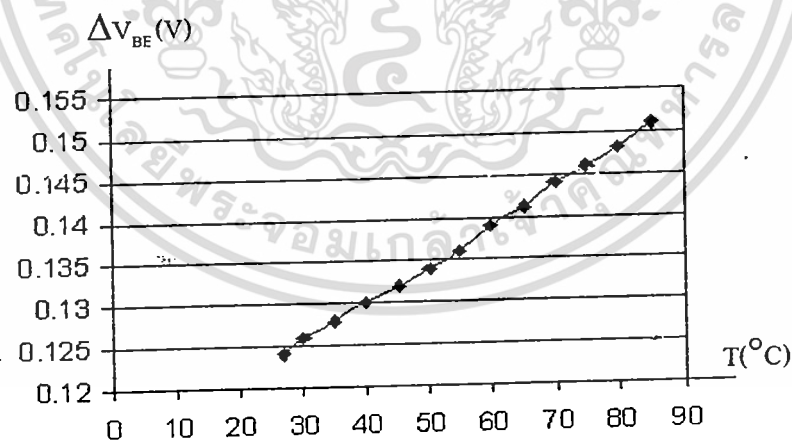
จากการที่ได้ออกแบบวงจรไว้แล้วนั้นเพื่อให้ผลการทดลองที่ได้เป็นไปอย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้น ดังนั้น ก่อนการทดลองต่อวงจรจริง จึงได้นำวงจรที่ออกแบบไว้ไปทำการsimulation ในโปรแกรม PSPICE โดยการต่อวงจรดังรูปที่ 4.1 กำหนดให้ค่า $V1=5\text{ V}$ $R_s=1\text{ k}\Omega$ $R1=100\text{ }\Omega$ $R2=500\text{ }\Omega$ หรือค่ากระแสต่างกัน 5 เท่า แล้วปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิระหว่าง $27^{\circ}\text{--}85^{\circ}\text{C}$ ซึ่งผลจากการ simulation โดยการวัดค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ ที่ได้จากการ simulation ในโปรแกรม PSPICE ที่กระแสต่างกัน 5 เท่า

จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติพื้นฐานของรอยต่อพี-เอ็น และเมื่อวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิโดยการหาค่าความชันของกราฟซึ่งจากกราฟจะได้อัตราการเปลี่ยนแปลงเป็น $0.377 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$

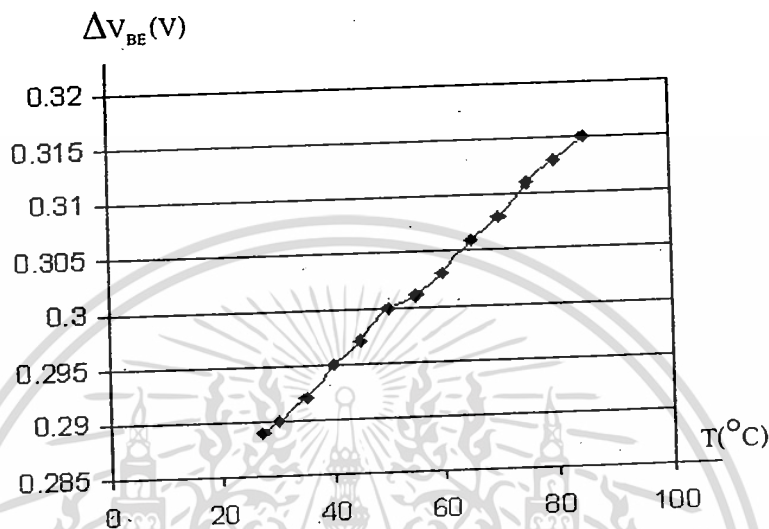
จากนั้นทำการต่อวงจรตามรูปที่ 4.1 ลงบนโฟโตบอร์ด โดยกำหนดให้ค่า $V_1=5\text{V}$ $R_s=1 \text{ k}\Omega$ $R_1=100 \text{ }\Omega$ $R_2=500 \text{ }\Omega$ หรือค่ากระแสต่างกัน 5 เท่า จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ทรานซิสเตอร์ (อุณหภูมิระหว่าง $27^{\circ}\text{--}85^{\circ}\text{C}$) โดยการใส่เข้าไปในเตาอบความร้อน แล้ววัดค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ซึ่งจากผลการทดลอง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ โดยกระแสต่างกัน 5 เท่า

จากกราฟจะเห็นได้ว่า ค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอย่างเป็นเชิงเส้นและเมื่อวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิโดยการหาค่าความชันของกราฟซึ่งจากกราฟจะได้อัตราการเปลี่ยนแปลงเป็น $0.4 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$

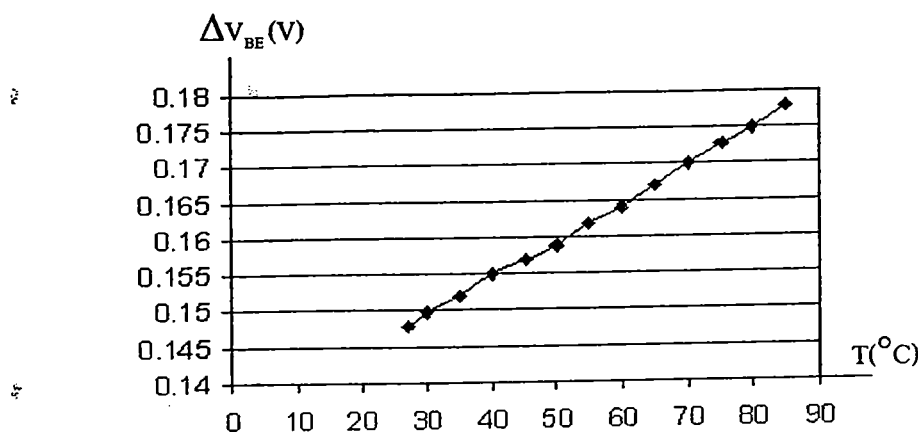
จากนั้นทำการเปลี่ยนค่าความต้านทานเป็น $R_s=1 \text{ k}\Omega$ $R_1= 100 \text{ }\Omega$ $R_2= 1000 \text{ }\Omega$ หรือค่ากระแสต่างกัน 10 เท่า โดยในตอนแรก ทำการทดลองโดยการ simulation ในโปรแกรม PSPICE ซึ่งผลจากการ simulation โดยการวัดค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ที่อุณหภูมิค่าต่างๆที่ได้จากการ simulation ในโปรแกรม PSPICE ที่กระแสต่างกัน 10 เท่า

จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิจะได้อัตราการเปลี่ยนแปลงเป็น $0.457 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$

จากนั้นทำการต่อวงจรลงบนไฟโชนบอร์ด โดยเปลี่ยนค่าความต้านทาน $R_s=1 \text{ k}\Omega$ $R_1= 100 \text{ }\Omega$ $R_2= 1000 \text{ }\Omega$ หรือค่ากระแสต่างกัน 10 เท่า จากนั้นทำการวัดค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ซึ่งจากผลการทดลอง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5

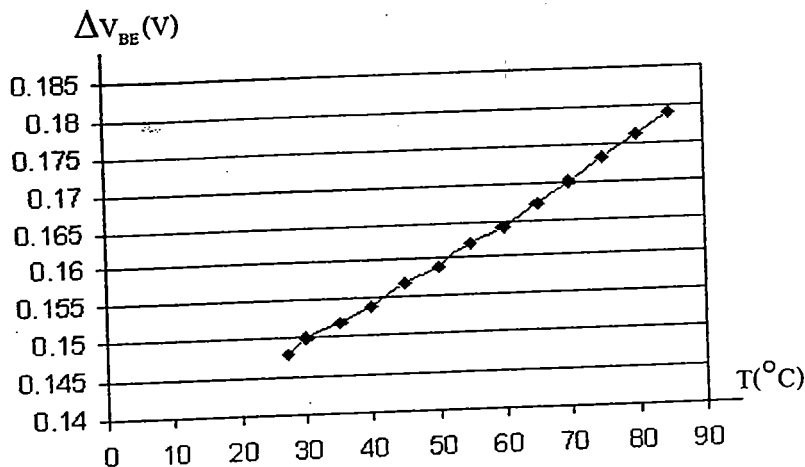


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ โดย
กระแสด่างกัน 10 เท่า

จากกราฟจะเห็นได้ว่า ค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอย่างเป็นเชิงเส้นและเมื่อวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิโดยการหาค่าความชันของกราฟซึ่งจากกราฟจะได้อัตราการเปลี่ยนแปลงเป็น $0.5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$

จากผลการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมดจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น และเมื่อพิจารณาค่าของ ΔV_{BE} ที่วัดได้จะพบว่าค่าของ ΔV_{BE} ที่กระแสด่างกัน 10 เท่าจะมีค่าสูงกว่าที่กระแสด่างกัน 5 เท่าซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการ $\Delta V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_2}{I_1}$ ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะกำหนดให้มีค่ากระแสด่างกัน 10 เท่าเพื่อที่จะทำให้ค่าที่วัดได้มีค่าสูงขึ้นซึ่งทำให้ง่ายต่อการวัดและบันทึกผลมากยิ่งขึ้น

ต่อไปจะพิจารณาถึงผลของปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวทรานซิสเตอร์โดยการลดปริมาณกระแสที่ไหลผ่านลงซึ่งทำได้โดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานเป็น $R_s = 1 \text{ M}\Omega$ และใช้ค่าความต้านทาน $R_1 = 100 \text{ }\Omega$ $R_2 = 1000 \text{ }\Omega$ เท่าเดิม ซึ่งจากผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



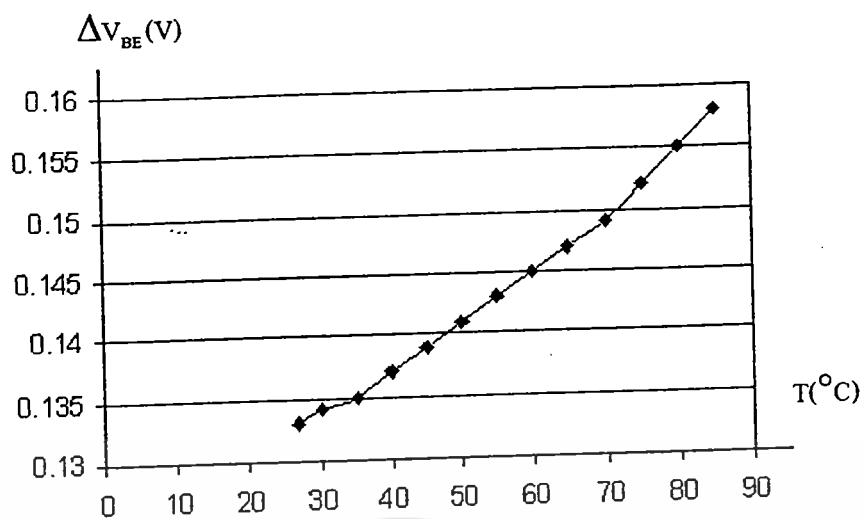
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์มีค่าลดลงจะไม่ส่งผลต่อค่าของความต่างศักย์ ΔV_{BE} ซึ่งเมื่อวัดค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิจะได้เป็น $0.5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ เท่าเดิม เนื่องจากรูปแบบของวงจรที่กำหนดให้มีปริมาณกระแสต่างกันเป็นจำนวนเท่า

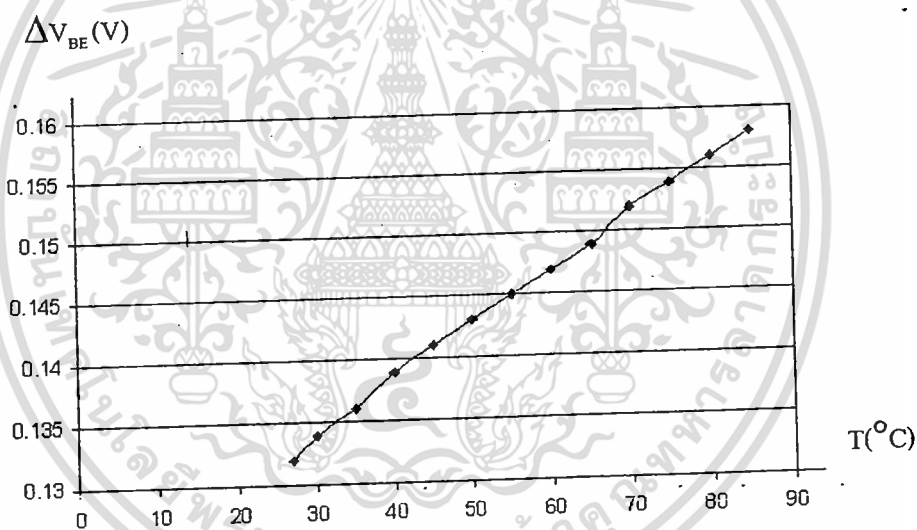
ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการ $\Delta V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_2}{I_1}$ จะพบว่าค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ไม่ได้ขึ้นอยู่กับ

ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์แต่จะขึ้นอยู่กับจำนวนเท่าของกระแสที่ต่างกัน ดังนั้นวงจรชนิดนี้จึงง่ายต่อการออกแบบซึ่งเพียงออกแบบให้ทรานซิสเตอร์สามารถทนปริมาณกระแสที่ไหลได้ก็เพียงพอ ดังนั้นวงจรนี้จึงใช้ค่าความต้านทาน $R_S = 1 \text{ k}\Omega$

จากผลการทดลองที่ผ่านมา ทรานซิสเตอร์ Q3 และ Q4 เพียง 2 ตัวเท่านั้นที่ได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นซึ่งในกระบวนการผลิตจริงนั้นตัวเซนเซอร์มักจะผลิตอยู่ในรูปของวงจรรวม ดังนั้นทุกส่วนของวงจรจึงได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นทั้งหมด การทดลองต่อไปจึงนำวงจรที่ต่อบนโฟโตบอร์ดกับบัดกรีลงบนแผ่นปริ้นซ์มาเข้าเตาอบทั้งหมดแล้วเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ซึ่งจากผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ โดยนำวงจรที่ต่อบนโฟโตบอร์ดเข้าเตาอบทั้งหมด

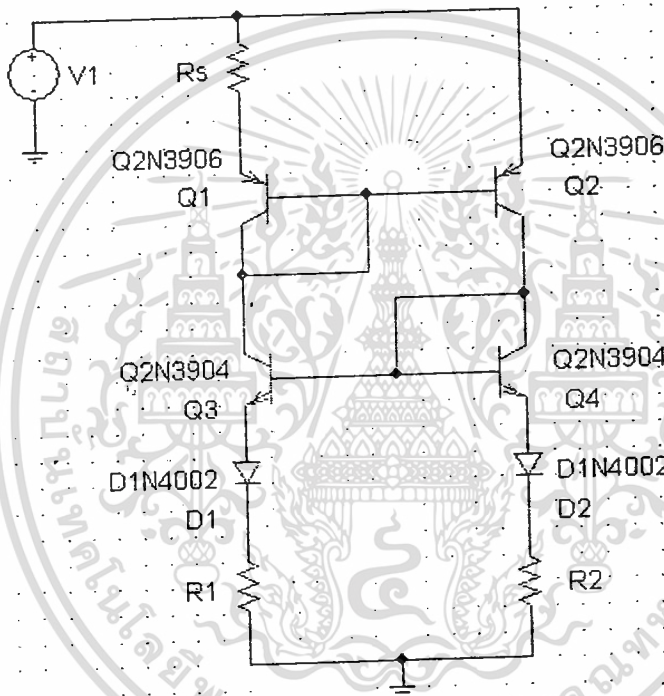


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ โดยนำวงจรที่ต่อบนแผ่นปริ้นซ์เข้าเตาอบทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

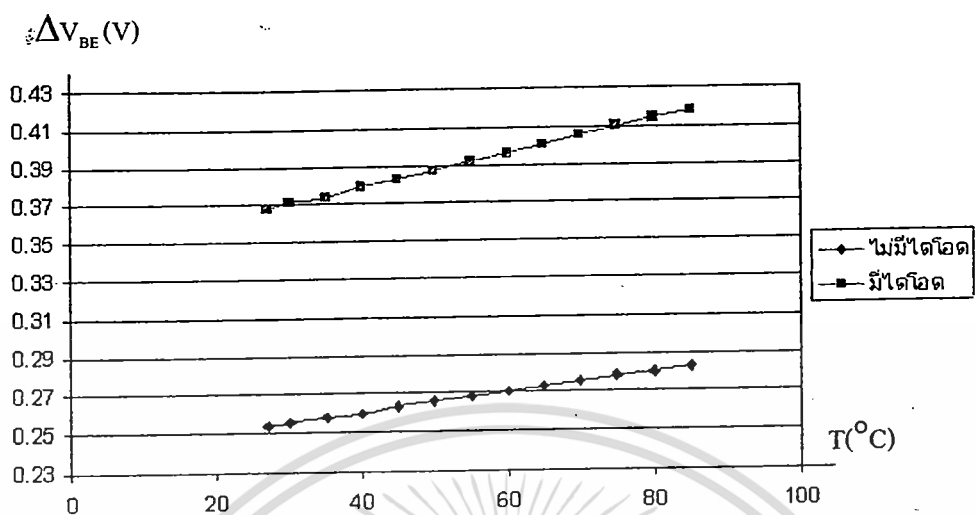
จากรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 เมื่อวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิ โดยการหาค่าความชันของกราฟซึ่งจากกราฟจะได้อัตราการเปลี่ยนแปลงเป็น $0.375 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ และ $0.4 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าค่าความชันของกราฟของวงจรที่ต่อบนแผ่นปรินต์มีค่ามากกว่า ซึ่งอาจเกิดจากผลของค่าความต้านทานและค่าความจุไฟฟ้าภายในตัวโฟโตบอร์ด จึงทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิมีค่าน้อยลง

จากนั้นต่อวงจรตามรูปที่ 4.9 ซึ่งวงจรนี้ได้เพิ่มไดโอดเข้าไปเพื่อศึกษาผลของไดโอดที่มีต่อค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE}



รูปที่ 4.9 วงจรที่ใช้ศึกษาผลของไดโอดที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE}

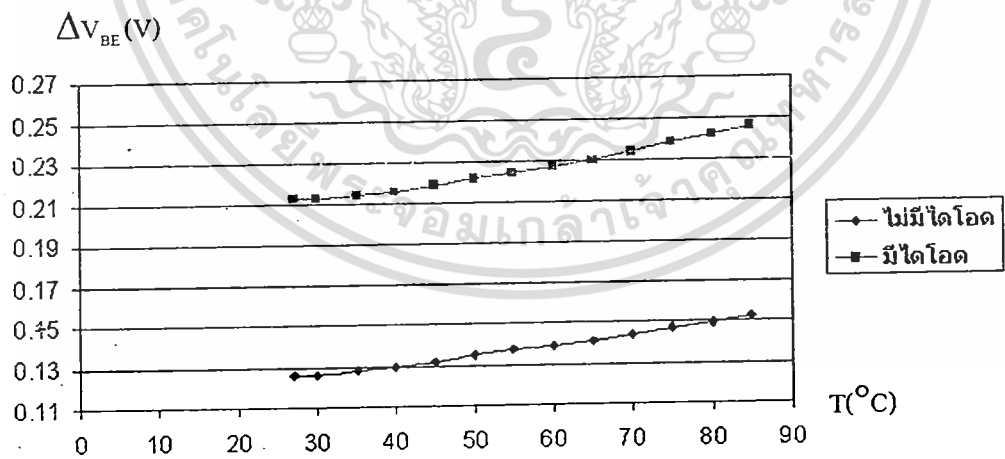
โดยในตอนแรกทำการsimulation ในโปรแกรมโปรแกรม PSPICE ซึ่งผลจากการ simulation แสดงได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่4.10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ขณะที่ไม่มีและไม่มีไดโอดที่อุณหภูมิค่าต่างๆที่ได้จากการ simulation ในโปรแกรม PSPICE

เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิขณะที่ไม่มีไดโอดเท่ากับ $0.457 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ และขณะที่มีไดโอดเท่ากับ $0.86 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.9 เท่าของค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ขณะที่ไม่มีไดโอด

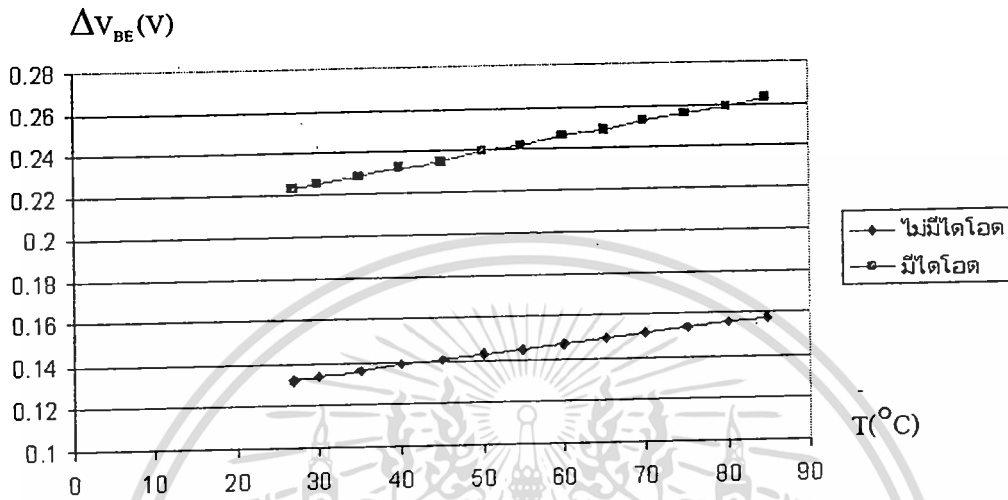
จากนั้นต้องจรรยาตามรูปที่4.9 ลงบนโฟโตบอร์ดแล้ววัดค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ขณะที่ไม่มีไดโอดซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ขณะที่ไม่มีและไม่มีไดโอดที่อุณหภูมิค่าต่างๆที่ได้จากการต่อวงจรลงบนโฟโตบอร์ด

เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิ ขณะที่ไม่มีไดโอดเท่ากับ $0.375 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ และขณะที่มีไดโอดเท่ากับ $0.6 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.8 เท่าของค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ขณะที่ไม่มีไดโอด

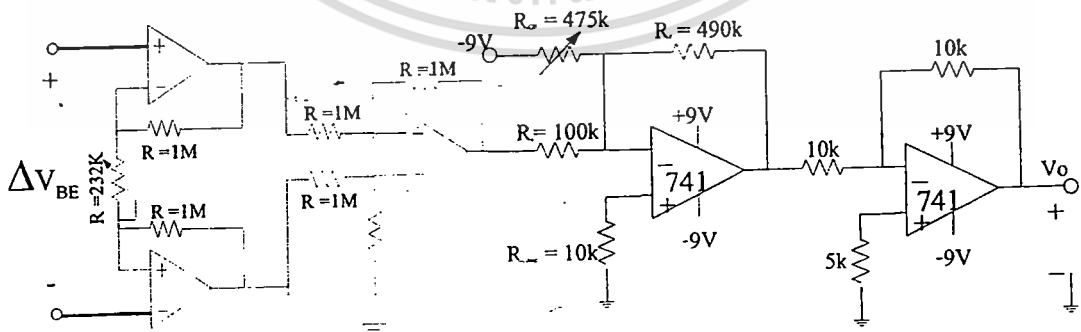
จากนั้นต้องวงจรตามรูปที่ 4.9 ลงบนแผ่นปริ้นซ์แล้ววัดค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ขณะที่ไม่มีไดโอดกับที่มีไดโอดได้ผลดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ขณะที่ไม่มีและที่มีไดโอดที่อุณหภูมิค่าต่างๆที่ได้จากการ ต่อวงจรลงบนแผ่นปริ้นซ์

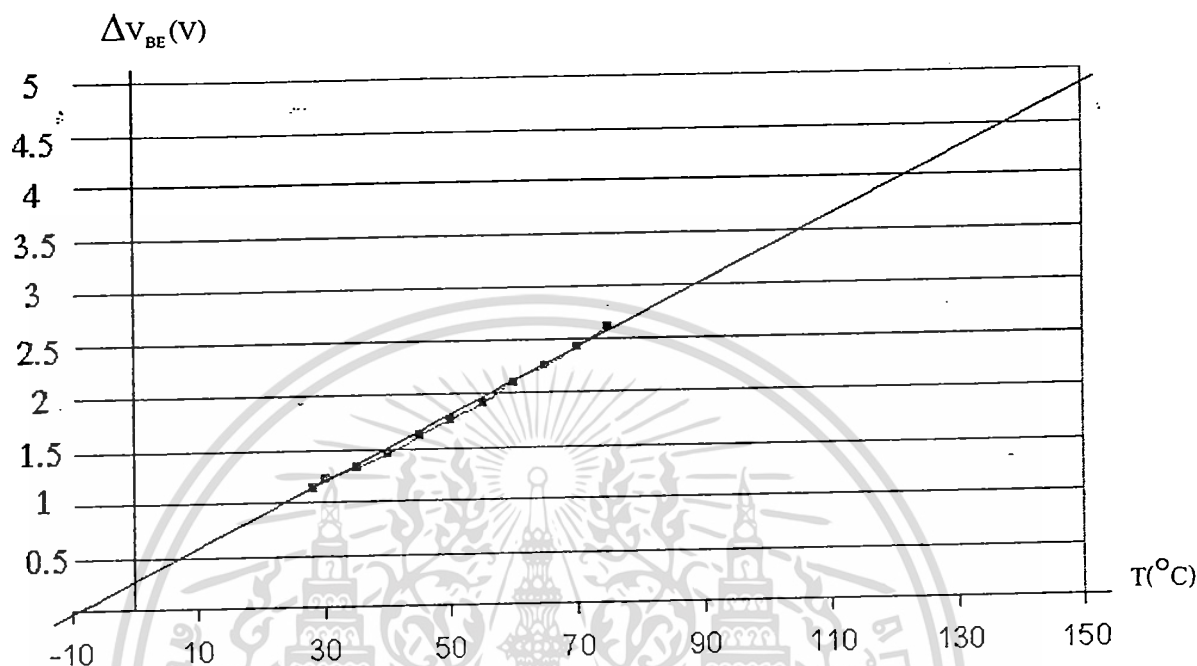
เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิ ขณะที่ไม่มีไดโอดเท่ากับ $0.4 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ และขณะที่มีไดโอดเท่ากับ $0.714 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าของค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ขณะที่ไม่มีไดโอด

จากนั้นนำค่า ΔV_{BE} ที่ได้จากวงจรตัวตรวจวัดอุณหภูมิไปเข้าวงจรขยายอินสตรูเมนต์ (Instrument Amplifier) และวงจรปรับความชันและตำแหน่งศูนย์ (Zero and Span circuit) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13



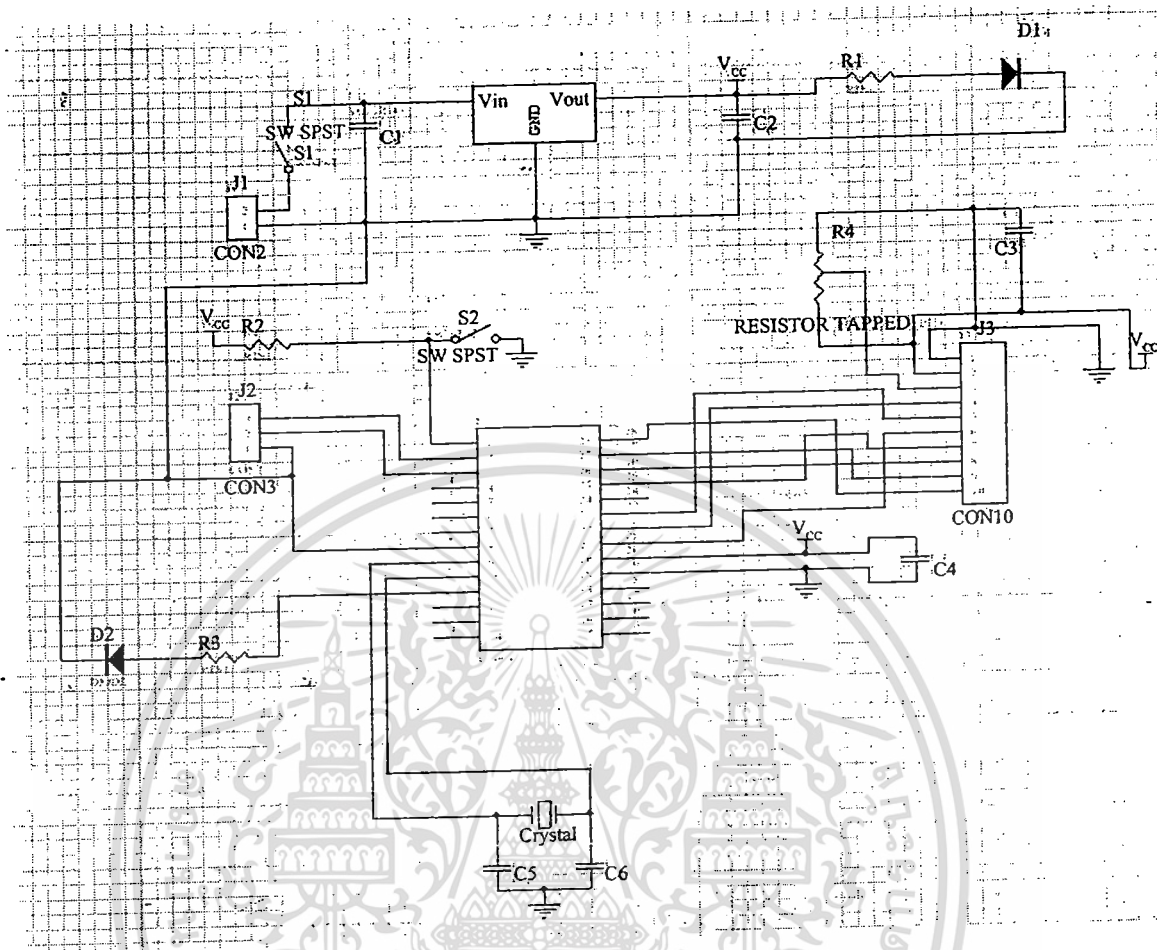
รูปที่ 4.13 แสดงวงจรที่ใช้ในการขยายสัญญาณและปรับแต่งสัญญาณ

วัดค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ที่ได้หลังจากการขยายและปรับแต่งสัญญาณ แล้วนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ΔV_{BE} และอุณหภูมิ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} หลังจากการขยายและปรับแต่งสัญญาณที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

ต่อมา นำผลที่ได้จากการขยายและปรับแต่งสัญญาณแล้ว เข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (เป็นฟังก์ชันที่อยู่ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F876A) แล้วใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการแสดงผลเป็นตัวเลขดิจิทัลบนจอ LCD ซึ่งวงจรที่ใช้สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 วงจรที่ใช้สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์

จากนั้น นำตัวตรวจวัดอุณหภูมิไปตรวจสอบความถูกต้องของการแสดงผล โดยใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิเข้าไปในเตาอบ / ตู้เย็น แล้วเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่แสดงบนจอ LCD กับค่าที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ ซึ่งจากผลการทดลอง แสดงได้ดัง ตารางที่ 4.1

อุณหภูมิที่อ่านได้ (°C)					%ความแตกต่าง เฉลี่ย
เทอร์โมมิเตอร์	LCD				
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย	
25	26.4	25.3	25.8	25.8	3.333
27	28.4	27.5	28	28	3.58
30	31.5	32	29.7	31.1	3.556
35	34.3	35.7	36.1	35.4	1.048
40	38.9	41.3	39.2	39.8	-0.5
45	43.7	44.6	46.3	44.9	-0.3
50	51.4	48.4	51.5	50.4	0.867
55	56.8	54.1	55.7	55.5	0.97
60	61.8	60.4	58.8	60.3	0.556
65	63.6	66.3	64.7	64.9	-0.21
70	68.2	71.4	70.1	69.9	-0.14
75	75	74.7	76.1	75.3	0.356
80	81.2	80.8	80.3	80.8	0.958
85	86.5	84.8	85.2	85.5	0.588

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่แสดงบนจอ LCD กับค่าที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากวงจรในรูปที่ 4.1 โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสที่เป็นตัวกำหนดกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัว ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการ $\Delta V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$ พบว่าค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} จะขึ้นอยู่กับจำนวนเท่าของกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวเท่านั้น ไม่ขึ้นกับปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวทรานซิสเตอร์เอง

ในตอนแรกทำการทดลองโดยทำการกำหนดกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ให้ต่างกัน 5 เท่า และให้ทรานซิสเตอร์ Q3, Q4 เข้าไปอยู่ในเตาอบ พบว่าค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอย่างเป็นเชิงเส้น โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิเป็น $0.4 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ และเมื่อปรับให้ความต่างของกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์เป็น 10 เท่า พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิเป็น $0.5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ จึงสรุปได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิ ขึ้นกับค่าอัตราส่วนของกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัว

จากนั้นทำการทดลองโดยให้ทั้งวงจรเข้าเตาอบทั้งหมดเพื่อให้อุปกรณ์ทุกตัวในวงจรได้รับความร้อนเท่ากัน และใช้อัตราส่วนกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ทั้งสองเป็น 10 เท่า โดยในตอนแรกลองทำการ Simulation บนโปรแกรม PSPICE พบว่าได้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิเป็น $0.457 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ และในการทดลองจริงจะต้องวงจรบนโฟโตบอร์ดและวงจรแผ่นปริ้นท์ พบว่าเมื่อต้องวงจรบนโฟโตบอร์ดจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิเป็น $0.375 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ และเมื่อต้องวงจรบนแผ่นปริ้นท์จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิเป็น $0.4 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าวงจรที่ต่อบนแผ่นปริ้นท์จะให้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิที่มากกว่าบนโฟโตบอร์ด ทั้งนี้เนื่องมาจากโฟโตบอร์ดอาจมีการสะสมความร้อนในตัวหรืออาจเกิดจากผลของค่าความต้านทานและค่าความจุไฟฟ้าภายในตัวโฟโตบอร์ดจึงทำให้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิของวงจรที่ต่อบนโฟโตบอร์ดมีค่าลดน้อยลง

ส่วนการทดลองตอนถัดไปนี้จะทำการเพิ่มไดโอดเข้ามาในวงจรด้วยดังรูปที่ 3.9 เพื่อศึกษาผลของไดโอดที่มีต่อค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} โดยในตอนแรกทำการ Simulate ผลการทดลองบนโปรแกรม PSPICE พบว่าได้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิเป็น $0.86 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ซึ่งในการทดลองจริงจะต้องวงจรลงบนโฟโตบอร์ดและแผ่นปริ้นท์เหมือนกับการทดลองตอนที่แล้ว จะพบว่าเมื่อต้องวงจรบนโฟโตบอร์ดจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE}

ต่ออุณหภูมิเป็น $0.6 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ในขณะที่ เมื่อต่อวงจรบนแผ่นปริ้นซ์จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิเป็น $0.714 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิของวงจรที่ต่อบนแผ่นปริ้นซ์ จะมีค่ามากกว่าวงจรที่ต่อบนโฟโตบอร์ด ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้วในการทดลองตอนที่แล้ว

เมื่อพิจารณาผลการทดลองทั้งหมดโดยการเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิขณะที่มีและไม่มีไดโอด จะพบว่า

อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิจากการ simulation บนโปรแกรม PSPICE เพิ่มขึ้นจาก $0.457 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ เป็น $0.86 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ พบว่าเพิ่มขึ้น 1.88 เท่า

อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิจากวงจรที่ต่อบนแผ่นโปรโตบอร์ดเพิ่มขึ้นจาก $0.375 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ เป็น $0.6 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ พบว่าเพิ่มขึ้น 1.6 เท่า

อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิจากวงจรที่ต่อบนแผ่นไขปลาเพิ่มขึ้นจาก $0.4 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ เป็น $0.714 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ พบว่าเพิ่มขึ้น 1.785 เท่า

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การมีไดโอดเพิ่มเข้าไปในวงจรนั้นทำให้ อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ΔV_{BE} ต่ออุณหภูมิมียค่าสูงขึ้น ทำให้วงจรที่ได้นั้นมีการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปได้ดีขึ้น

และเมื่อทำการนำเอาค่าความต่างศักย์ที่ได้จากวงจรวัด ไปเข้าวงจรขยายอินสตรูเมนต์ (Instrument Amplifier) และวงจรปรับความชันและตำแหน่งศูนย์ (Zero and Span circuit) เพื่อให้ความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง $0 - 5 \text{ V}$ ดังรูปที่ 4.13 และผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.14

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อผ่านการขยายและปรับแต่งแล้ว การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์กับอุณหภูมิยังคงมีลักษณะเป็นเชิงเส้น แต่เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์จึงสามารถทำการวัดจริงได้ในช่วง $25 - 85^{\circ}\text{C}$ เท่านั้น จึงใช้คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของตัวตรวจวัดโดยทำการต่อเส้นกราฟออกไปเพื่อให้ได้ช่วงอุณหภูมิ -10 ถึง 150°C ซึ่งจากกราฟพบว่าที่อุณหภูมิ -10°C ความต่างศักย์จะมีค่าประมาณ 0 V และที่อุณหภูมิ 150°C ความต่างศักย์มีค่าประมาณ 4.8 V ซึ่งอยู่ในช่วง $0 - 5 \text{ V}$ ตามที่ใดกำหนดไว้ จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ไปเข้าวงจรแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อใช้เป็นอินพุตของ

เมื่อทำการทดลองโดยใช้เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้นไปใช้วัดอุณหภูมิจริง ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 จากตารางเป็นการอ่านค่าอุณหภูมิจากเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้น โดยเปรียบเทียบกับที่อ่านได้กับเทอร์โมมิเตอร์ปรอท แล้วหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่เกิดขึ้น จะพบว่า อุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์ปรอทกับเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิแบบไดโอดคู่ มีค่าที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยซึ่งค่าความแตกต่างนี้ยังคงอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ เนื่องจากค่าที่อ่านได้

จากเทอร์โมมิเตอร์ปรอทที่ใช้เปรียบเทียบกับอุณหภูมินั้น เป็นค่าที่ได้จากการคาดคะเนด้วยสายตาของตัวผู้ทดลองและไม่สามารถอ่านค่าให้มีความละเอียดเป็นเลขทศนิยมได้ ดังนั้นอุณหภูมิที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นจึงอาจมีค่าที่แตกต่างจากเทอร์โมมิเตอร์ปรอทได้

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้นมานั้นมีความถูกต้องแม่นยำสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้จริง

ในการทดลองนี้มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความละเอียดของเทอร์โมมิเตอร์, ช่วงการวัดอุณหภูมิซึ่งเตาอบที่ใช้ในการทดลองสามารถวัดอุณหภูมิได้เพียง $25 - 85^{\circ}\text{C}$ เท่านั้น ซึ่งมีผลทำให้การทดลองได้ข้อมูลไม่เพียงพอเท่าที่ควร อย่างไรก็ตาม ข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองเหล่านี้ จะเป็นประโยชน์ และสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ดียิ่งขึ้นต่อไป



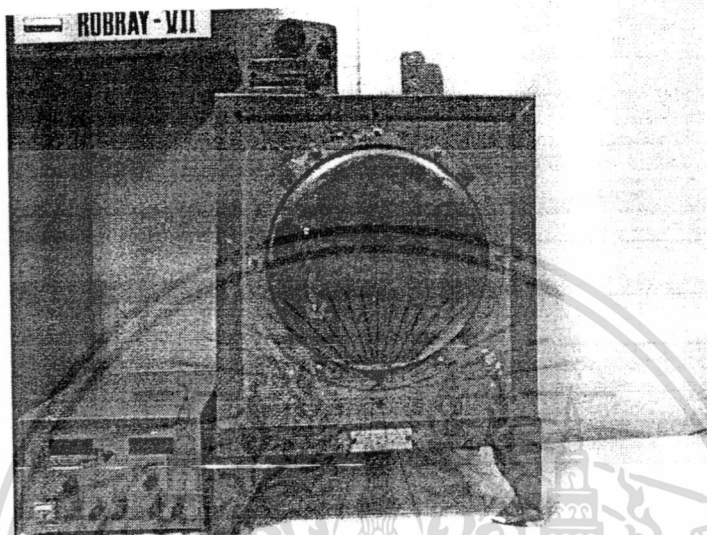
หนังสืออ้างอิง

1. S.M. SZE, "Semiconductor sensor", John Wiley & Sons, 1994.
2. S. Middelhoek, S. A. Audet, "Silicon Sensor", Academid Press, 1989.
3. D. Neamen, "Semiconductor Physics & Devices, Erwin,
4. J. Gardner, Microsensors, John Wiley & Sons, 1996.
5. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.
6. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, เอกสารประกอบการสอนเซนเซอร์และทรานดิวเซอร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
7. รศ.ดร.สมเกียรติ สุกเดช, "Semiconductor Devices", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
8. เอกสารประกอบการอบรมความรู้ด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น, Electronics Research Center, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
9. สิริรัช โภคยอุดม, การวิเคราะห์และสังเคราะห์วงจรร่วม เล่มที่ 1

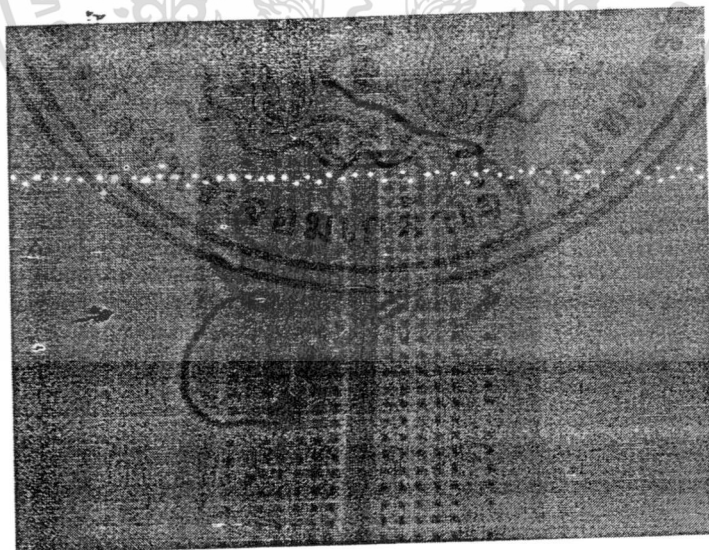
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

รูปภาพประกอบการทดลอง

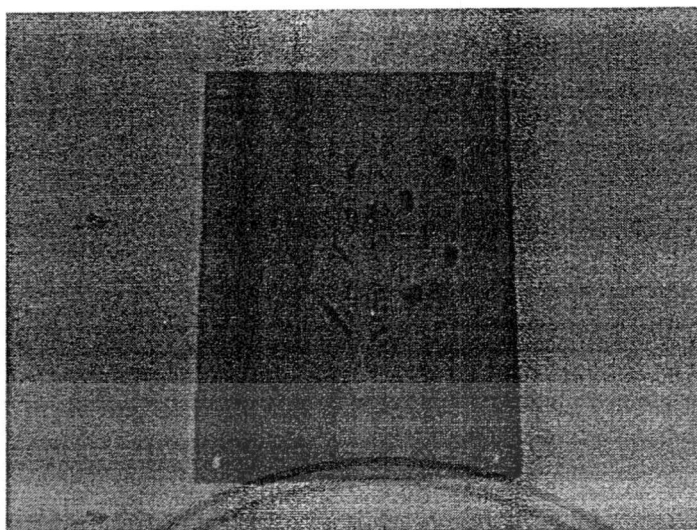


รูปที่ 1 เคาอบและแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ในการทดลอง

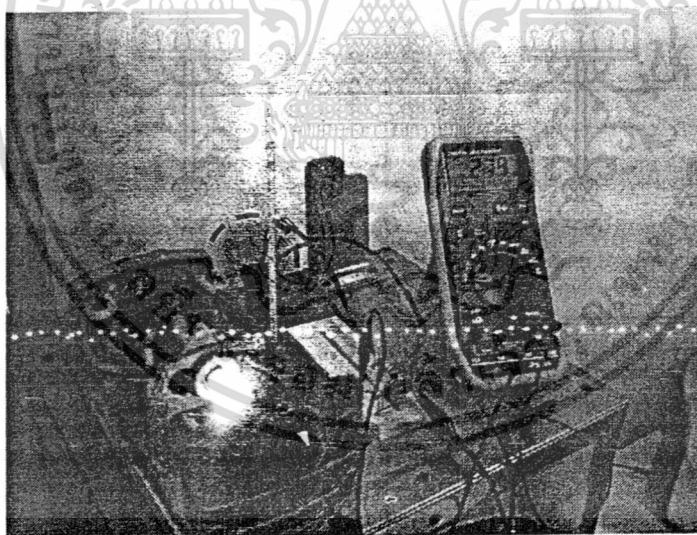


รูปที่ 2 รูปวงจรที่ต่อลงโฟโตบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

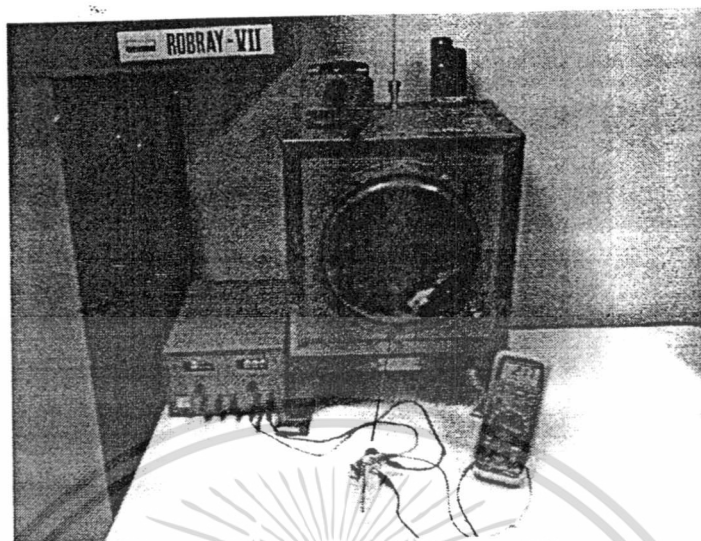


รูปที่ 3 รูปวงจรที่ต่อลงแผ่นปริ้นซ์

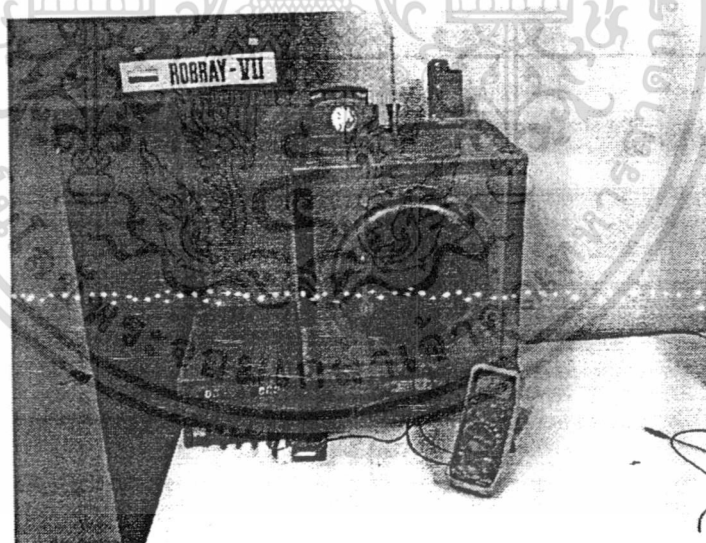


รูปที่ 4 นำทรานซิสเตอร์ Q3 , Q4 เข้าเตาอบโดยใส่เข้าทางช่องที่อยู่ด้านหลัง
แล้วทำการวัดค่าของ ΔV_{BE}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

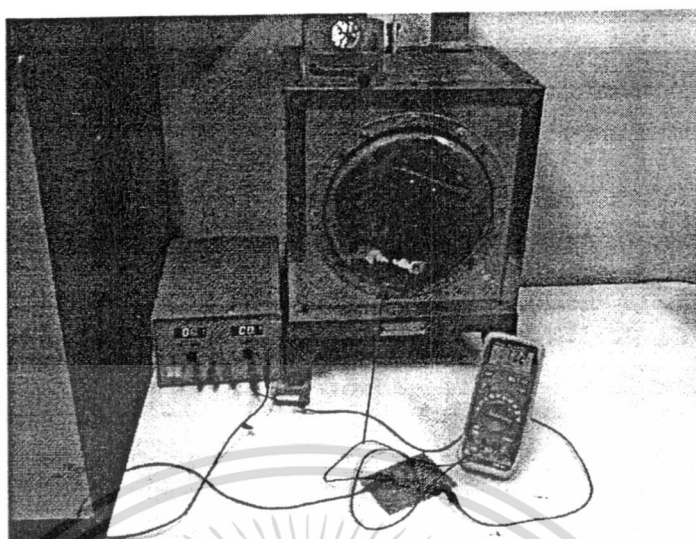


รูปที่ 5 นาฬิกาจรที่ต่อลงบอร์ดเข้าเตาอบ



รูปที่ 6 ทำการวัดหาค่าของ ΔV_{BE}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

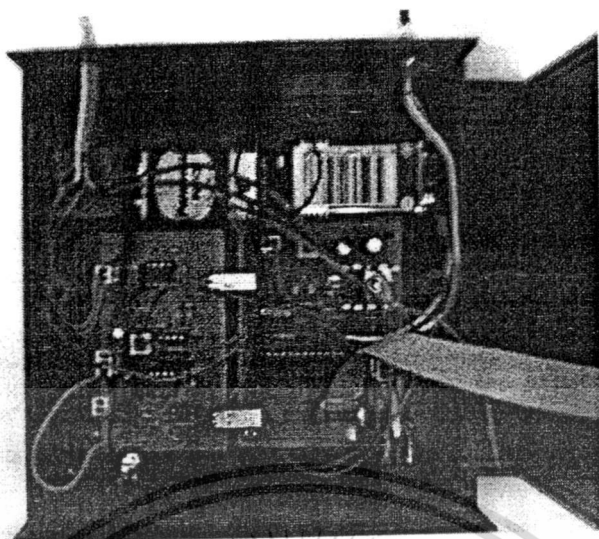


รูปที่ 7 นำวงจรที่ต่อลงแผ่นไขปลาเข้าเตาอบแล้วทำการวัดค่าของ ΔV_{BE}

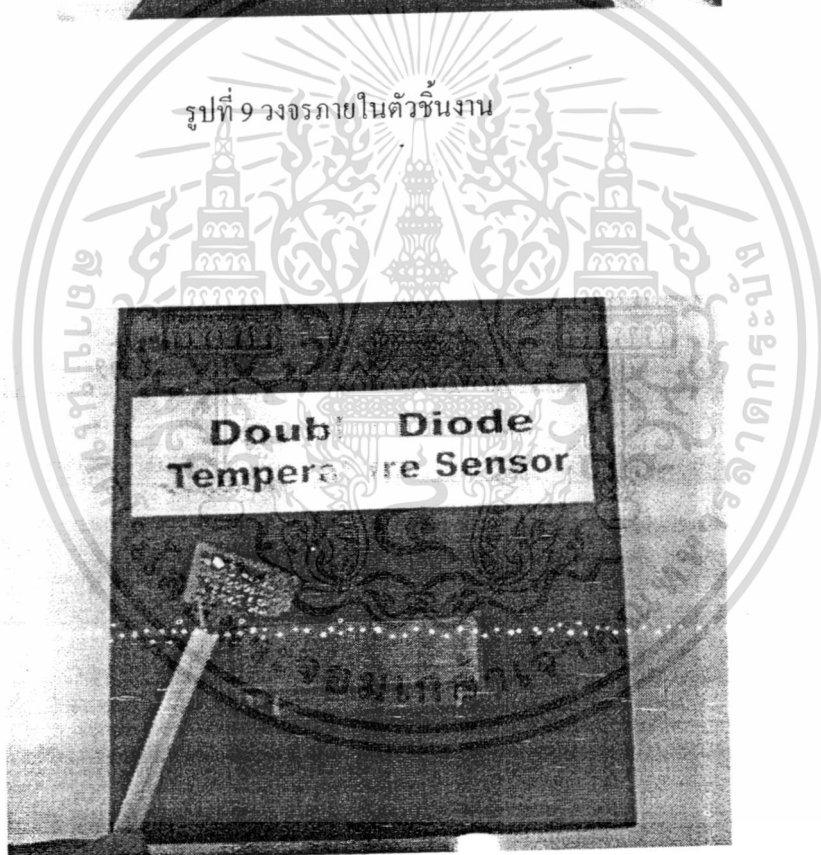


รูปที่ 8 หัววัดอุณหภูมิแบบไดโอดคู่ที่สร้างขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 วงจรภายในตัวชิ้นงาน



รูปที่ 10 ภาพตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบไดโอดคู่ที่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Source code for LCD function

```
// D0 enable
// D1 rs
// D2 rw
// D4 D4
// D5 D5
// D6 D6
// D7 D7
//
// LCD pins D0-D3 are not used and PIC D3 is not used.

// Un-comment the following define to use port B
// #define use_portb_lcd TRUE

struct lcd_pin_map {          // This structure is overlaid
    BOOLEAN enable;           // on to an I/O port to gain
    BOOLEAN rs;               // access to the LCD pins.
    BOOLEAN rw;               // The bits are allocated from
    BOOLEAN unused;           // low order up. ENABLE will
    int data : 4;             // be pin B0.
} lcd;

#if defined(_PCH_)
#if defined use_portb_lcd
    #byte lcd = 0xF81         // This puts the entire structure
#else
    #byte lcd = 0xF83         // This puts the entire structure
#endif
#else
#if defined use_portb_lcd
    #byte lcd = 6             // on to port B (at address 6)
#else
    #byte lcd = 8             // on to port D (at address 8)
#endif
#endif

#if defined use_portb_lcd
    #define set_tris_lcd(x) set_tris_b(x)
#else
    #define set_tris_lcd(x) set_tris_d(x)
#endif

#define lcd_type 2           // 0=5x7, 1=5x10, 2=2 lines
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
#define lcd_line_two 0x40 // LCD RAM address for the second line
```

```
BYTE const LCD_INIT_STRING[4] = {0x20 | (lcd_type << 2), 0xc, 1, 6};  
    // These bytes need to be sent to the LCD  
    // to start it up.
```

```
    // The following are used for setting  
    // the I/O port direction register.
```

```
struct lcd_pin_map const LCD_WRITE = {0,0,0,0,0}; // For write mode all pins are  
out  
struct lcd_pin_map const LCD_READ = {0,0,0,0,15}; // For read mode data pins are  
in
```

```
BYTE lcd_read_byte() {  
    BYTE low,high;  
    set_tris_lcd(LCD_READ);  
    lcd.rw = 1;  
    delay_cycles(1);  
    lcd.enable = 1;  
    delay_cycles(1);  
    high = lcd.data;  
    lcd.enable = 0;  
    delay_cycles(1);  
    lcd.enable = 1;  
    delay_us(1);  
    low = lcd.data;  
    lcd.enable = 0;  
    set_tris_lcd(LCD_WRITE);  
    return( (high<<4) | low);  
}
```

```
void lcd_send_nibble( BYTE n ) {  
    lcd.data = n;  
    delay_cycles(1);  
    lcd.enable = 1;  
    delay_us(2);  
    lcd.enable = 0;  
}
```

```
void lcd_send_byte( BYTE address, BYTE n ) {  
    lcd.rs = 0;  
    while ( bit_test(lcd_read_byte(),7) );  
    lcd.rs = address;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

delay_cycles(1);
lcd.rw = 0;
delay_cycles(1);
lcd.enable = 0;
lcd_send_nibble(n >> 4);
lcd_send_nibble(n & 0xf);
}

```

```

void lcd_init() {
    BYTE i;
    set_tris_lcd(LCD_WRITE);
    lcd.rs = 0;
    lcd.rw = 0;
    lcd.enable = 0;
    delay_ms(15);
    for(i=1;i<=3;++i) {
        lcd_send_nibble(3);
        delay_ms(5);
    }
    lcd_send_nibble(2);
    for(i=0;i<=3;++i)
        lcd_send_byte(0,LCD_INIT_STRING[i]);
}

```

```

void lcd_gotoxy( BYTE x, BYTE y) {
    BYTE address;

    if(y!=1)
        address=lcd_line_two;
    else
        address=0;
    address+=x-1;
    lcd_send_byte(0,0x80|address);
}

```

```

void lcd_putc( char c) {
    switch (c) {
        case '\f' : lcd_send_byte(0,1);
                    delay_ms(2);
                    break;
        case '\n' : lcd_gotoxy(1,2);   break;
        case '\b' : lcd_send_byte(0,0x10); break;
        default   : lcd_send_byte(1,c);  break;
    }
}

```

```

char lcd_getc( BYTE x, BYTE y) {
    char value;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

lcd_gotoxy(x,y);
while ( bit_test(lcd_read_byte(),7) ); // wait until busy flag is low
lcd.rs=1;
value = lcd_read_byte();
lcd.rs=0;
return(value);
}

```

Source code for Program

```

#include<16f876a.h>
#define CLOCK_SP 4000000
#define fuses HS,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP
#define device ADC=16
#define use_delay (clock=CLOCK_SP)
#define use_PORTB_LCD
#include "lcd.c"
#define STRING_SIZE 17
#include <stdlib.h>

```

```

float value,data;
float volt,temp;

```

```

void main() {
lcd_init();
setup_port_a( ALL_ANALOG );
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
printf(lcd_putc,"Diode TEMP Meter");
set_adc_channel(0);

```

```

do{
output_high(PIN_C0);
value = Read_ADC();
data=value;
volt=value/13094.4;
temp=(33.04*volt)-9.1;
lcd_gotoxy(1,2);
printf(lcd_putc,"TEMP: %G",temp);

```

```

} while(TRUE);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้