

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบไดโอดคู่

Double diode temperature sensor



โดย

นาย คติศรี อิงคณิตยกุล 46010234

นาย ดำรง กอปรศรีสวัสดิ์ 46010237

นาย พีรวิชญ์ หาญนาโชน 46010541

รับ  
6/12/50  
2549

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 72110  
วัน.เดือน.ปี..... 8 ส.ย. 2550

b..... 117 b391b  
i.....

ปฏิญานีพจน์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบไดโอดคู่

Double diode temperature sensor

โดย

นาย คลิษฐ์ อิงคนิตยกุล 46010234

นาย ดำรง กอประศรีสวัสดิ์ 46010237

นาย พีรวิชัย หาญนาโโชค 46010541

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง **ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบไดโอดคู่**

**Double Diode Temperature Sensor**

ผู้จัดทำ

- |                |                |          |
|----------------|----------------|----------|
| 1. นายคณิศร์   | อิงกนิตยกุล    | 46010234 |
| 2. นายดำรง     | กอปรศรีสวัสดิ์ | 46010237 |
| 3. นายพีรวิชญ์ | หาญนวโชค       | 46010541 |

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รศ. ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบไดโอดคู่

นาย ดลิสร์ อิงคนิตยกุล 46010234

นาย คำรง กอปรศรีสวัสดิ์ 46010237

นาย พีรวิษญ์ หาญนวโชค 46010541

รศ.ดร. เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล

ปีการศึกษา 2549

## บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้กล่าวถึงการศึกษาการทำงานและกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดอุณหภูมิ ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบไดโอดคู่ ซึ่งใช้หลักการของ PTAT (Proportional To Absolute Temperature) โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่เป็นตัวจ่ายกระแสให้แก่ไดโอดทั้งสอง ซึ่งกระแสที่ไหลผ่านไดโอดทั้งสองนี้จะมีค่าไม่เท่ากัน โดยจะใช้ค่าความต้านทานเป็นตัวกำหนดค่ากระแสที่ไหลผ่านไดโอดให้มีจำนวนเท่าที่แตกต่างกันเป็น 5 เท่า และ 10 เท่า ตามลำดับ จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ไดโอด (อุณหภูมิระหว่าง 27°-85°C) แล้ววัดความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$

( $\Delta V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_2}{I_1} \right)$ ) ซึ่งจากคุณสมบัติพื้นฐานของรอยต่อพี-เอ็นพบว่าถ้ากระแสที่ไหลผ่านรอยต่อคงที่แล้วให้รอยต่อพี-เอ็นได้รับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $\Delta V_{BE}$  (v) กับ T(°C) จะพบว่า ค่า  $\Delta V_{BE}$  เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอย่างเป็นเชิงเส้น

ในส่วนของการแสดงผลนั้น เรานำค่า  $\Delta V_{BE}$  ที่ได้ไปผ่านวงจรแปลงสัญญาณเพื่อแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล แล้วใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมให้แสดงผลของอุณหภูมิออกบนจอLCD เพื่อให้สังเกตและอ่านค่าอุณหภูมิได้ง่ายขึ้น

# Double diode temperature sensor

Mr. Dalis Engcanittayakul I.D. 46010234

Mr. Damrong Korbsrisawat I.D. 46010237

Mr. peeravich Harnavachok I.D. 46010541

Assoc.Prof. Dr. Toempong Phetchakul

Education Year 2549

## Abstract

This report study the mechanism and fabrication of temperature sensor that have several type. In this project will scope in double diode temperature sensor which uses the principle of PTAT (Proportional To Absolute Temperature). The current constant circuit is uses for bias a double diode. The current flows through the double is not equal. Resistor is used for set the current diodes which have the current ratio 5 times and 10 times respectively, and the increasing temperature between

27°-85°C, The different forward voltage  $\Delta V_{BE}$  ( $\Delta V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_2}{I_1} \right)$ ) is measured as the output voltage. From the basic characteristic of p-n junction if the p-n junction has the constant current when it warming voltage across the junction is increasing too. Plot the characteristic of  $\Delta V_{BE} - T(^{\circ}\text{C})$  found that  $\Delta V_{BE}$  is linearity increasing with temperature.

In a display part , we change output voltage from analog to digital by A/D circuit and display by LCD which is controlled by microcontroller.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ ด้วยการได้รับคำแนะนำและให้คำปรึกษาที่ดี  
มากจากอาจารย์ที่ปรึกษาประจำโครงการนี้ รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล อีกทั้งยังได้รับความ  
ช่วยเหลือจาก นายรัฐพงษ์ นาคาไชย นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
รวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ของทางสถาบัน ที่คอยให้คำแนะนำ และช่วยเหลือ  
ในทุก ๆ ด้าน

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจตลอดมา และสุดท้ายขอ  
กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุน รวมทั้งการอบรมสั่งสอนที่ดี จนทำให้โครงการ  
ชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ   |      |
| 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  |      |
| 2.2.1 รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล   | 8    |
| 2.2.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง                                | 10   |
| 2.2.3 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ                           | 14   |
| 2.3 วงจรจ่ายกระแสคงตัว   |      |
| 2.3.1 ความหมายของวงจรจ่ายกระแสคงตัว  | 16   |
| 2.3.2 วงจรดึงกระแสคงที่ ที่ใช้ความต้านทานในการไบอัส                        | 17   |
| 2.4 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง   | 19   |
| 2.5 วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์                                      | 22   |
| 2.6 PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์  | 24   |
| 2.6.1 PIC Microcontroller ชนิดต่าง ๆ                                       | 24   |
| 2.6.2 PIC Microcontroller เบอร์ต่าง ๆ                                      | 25   |
| 2.6.3 โครงสร้างของ 16F876A PIC Microcontroller                             | 30   |
| 2.6.3.1 คุณสมบัติของ PIC16F876A  | 30   |
| 2.6.3.2 โครงสร้างการทำงานภายในของ PIC16F876A                               | 31   |
| 2.6.3.3 การจัดสรรหน่วยความจำโปรแกรมของ PIC16F876A                          | 34   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 2.6.3.4 การจัดสรรหน่วยความจำข้อมูล RAM ของ PIC16F876A | 35   |
| 2.6.3.5 รีจิสเตอร์หลักของ PIC16F876A                  | 38   |
| บทที่ 3 กระบวนการสร้างไดโอดชนิดรอยต่อ พี-เอ็น         | 40   |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง                                    | 53   |
| บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง                      | 65   |
| ภาคผนวก   |      |

ภาคผนวก ก. รูปภาพประกอบการทดลอง

ภาคผนวก ข. เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการสร้างไดโอด

ภาคผนวก ค. ลายวงจรที่ใช้ในการทดลองและ Source Code

ภาคผนวก ง. Data Sheet

กิตติกรรมประกาศ

หนังสืออ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 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<br>(ก) เมื่อไม่ได้รับไบอัส กับ (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัส $V_A$                   | 11   |
| รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า<br>(ก) เมื่ออยู่ในภาวะสมดุลและ (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง $V_A$          | 12   |
| รูปที่ 2.10 การกระจายความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ<br>(ก) เมื่อไม่ได้รับแรงดันไบอัส (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัส $V_A$  | 13   |
| รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อ (ก) เมื่อไม่ได้รับไบอัส กับ<br>(ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$         | 14   |
| รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่ออยู่ในภาวะสมดุลกับเมื่อได้รับ<br>แรงดันไบอัสไบอัส $-V_A$               | 15   |
| รูปที่ 2.13 การกระจายความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ<br>(ก) เมื่อไม่ได้รับแรงดันไบอัส (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัส $-V_A$ | 16   |
| รูปที่ 2.14 (ก) แสดงสัญลักษณ์ของวงจรคั่นกระแสคงตัว<br>(ข) แสดงสัญลักษณ์ของวงจรคั่นกระแสคงตัว                                      | 17   |
| รูปที่ 2.15 แสดงการวงจรคั่นกระแสคงที่ที่ใช้ความต้านทานในการปรับอัตราส่วน<br>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   |

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 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 ขนาดของไดโอดที่ออกแบบ   | 40   |
| รูปที่ 3.2 มาตรฐานที่ 1 การแพร่สารเจือชนิดพี                                   | 40   |
| รูปที่ 3.3 มาตรฐานที่ 2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น                                 | 41   |
| รูปที่ 3.4 มาตรฐานที่ 3 การเปิดช่องคอนแท็ค                                     | 41   |
| รูปที่ 3.5 มาตรฐานที่ 4 การสร้างขั้วไฟฟ้า                                      | 41   |
| รูปที่ 3.6 แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น   | 41   |
| รูปที่ 3.7 แผ่นผลึกซิลิกอนหลังการออกซิเดชันครั้งที่ 1                          | 43   |
| รูปที่ 3.8 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาตรฐานที่ 1                                 | 43   |
| รูปที่ 3.9 การสกัดชั้นออกไซด์  | 44   |
| รูปที่ 3.10 กระบวนการลอกฟิล์ม  | 44   |
| รูปที่ 3.11 กระบวนการขั้วลึกระดมสารเจือชนิดพี                                  | 45   |
| รูปที่ 3.12 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาตรฐานที่ 2                                | 46   |
| รูปที่ 3.13 การสกัดชั้นออกไซด์   | 46   |
| รูปที่ 3.14 กระบวนการลอกฟิล์ม  | 47   |
| รูปที่ 3.15 กระบวนการขั้วลึกระดมสารเจือชนิดเอ็น                                | 48   |
| รูปที่ 3.16 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาตรฐานที่ 3                                | 48   |
| รูปที่ 3.17 การสกัดชั้นออกไซด์   | 49   |
| รูปที่ 3.18 กระบวนการลอกฟิล์ม  | 49   |
| รูปที่ 3.19 การเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศ                                 | 50   |
| รูปที่ 3.20 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาตรฐานที่ 4                                | 51   |
| รูปที่ 3.21 การสกัดชั้นอะลูมิเนียม   | 51   |
| รูปที่ 3.22 กระบวนการลอกฟิล์ม  | 52   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 3.23 หัววัดอุณหภูมิแบบไดโอดคู่ที่สร้างขึ้น   | 52   |
| รูปที่ 3.24 คุณลักษณะของกระแส-แรงดัน ของไดโอดที่สร้างขึ้น   | 52   |
| รูปที่ 4.1 แสดงวงจรแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ใช้ค่าความต้านทานเป็นตัวกำหนดค่ากระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์  | 53   |
| รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ $\Delta V_{BE}$ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆที่ได้จากการ simulation ในโปรแกรม PSPICE ที่กระแสต่างกัน 5 เมา   | 54   |
| รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ $\Delta V_{BE}$ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ โดยกระแสต่างกัน 5 เมา   | 54   |
| รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ $\Delta V_{BE}$ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ ที่ได้จากการ simulation ในโปรแกรม PSPICE ที่กระแสต่างกัน 10 เมา | 55   |
| รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ $\Delta V_{BE}$ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ โดยกระแสต่างกัน 10 เมา  | 56   |
| รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ $\Delta V_{BE}$ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ   | 57   |
| รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ $\Delta V_{BE}$ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ โดยนำวงจรที่ต่อบนโพโตบอร์ดเข้าเตาอบทั้งหมด                      | 58   |
| รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ $\Delta V_{BE}$ ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ โดยนำวงจรที่ต่อบนแผ่นปริ้นซ์เข้าเตาอบทั้งหมด                    | 58   |
| รูปที่ 4.9 วงจรที่ใช้ศึกษาผลของไดโอดที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ $\Delta V_{BE}$  | 59   |
| รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ $\Delta V_{BE}$ ขณะที่มีและไม่มีไดโอด ที่อุณหภูมิค่าต่างๆที่ได้จากการ simulation ในโปรแกรม PSPICE  | 60   |
| รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ $\Delta V_{BE}$ ขณะที่มีและไม่มีไดโอด ที่อุณหภูมิค่าต่างๆที่ได้จากการต่อวงจรลงบนโพโตบอร์ด          | 60   |
| รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ $\Delta V_{BE}$ ขณะที่มีและไม่มีไดโอด ที่อุณหภูมิค่าต่างๆที่ได้จากการ ต่อวงจรลงบนแผ่นปริ้นซ์       | 61   |
| รูปที่ 4.13 แสดงวงจรที่ใช้ในการขยายสัญญาณและปรับแต่งสัญญาณ  | 61   |
| รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ $\Delta V_{BE}$ หลังจากการขยาย และปรับแต่งสัญญาณที่อุณหภูมิค่าต่างๆ                                | 62   |
| รูปที่ 4.15 วงจรที่ใช้สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์   | 63   |

## สารบัญตาราง

|   |      |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของขา PIC 16F876A  | หน้า |
| ตารางที่ 2.2 ค่า PCLATH<4:3> ในการเลือก Page ของ 16F876A                                    | 32   |
| ตารางที่ 2.3 ค่า RP0 และ RP1 ในการเลือก Bank ของ 16F876A                                    | 34   |
| ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่แสดงบนจอ LCD กับค่าที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ | 36   |
|   | 64   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

ในปัจจุบัน ระบบการวัดตลอดจนระบบควบคุมกระบวนการผลิตต่าง ๆ ทางอุตสาหกรรม นั้น อุปกรณ์หลักที่สำคัญอย่างมากไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าอุปกรณ์ส่วนอื่นในระบบควบคุมเลยก็คือ อุปกรณ์เซ็นเซอร์ (sensor) หรืออาจกล่าวได้ว่า ระบบการวัดและระบบควบคุมกระบวนการผลิตจะไม่สามารถทำงานได้เลยหากขาดอุปกรณ์ที่เราเรียกว่า เซ็นเซอร์

ดังนั้นด้วยปัจจัยความสำคัญของเซนเซอร์ที่มีต่อการวัดค่าและควบคุมกระบวนการนี้เอง จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ โดยมุ่งเน้นถึงหลักการทำงานพื้นฐานและการนำไปประยุกต์ใช้งานของเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ ซึ่งจะรวมไปถึง โครงสร้าง หลักการทำงาน และ หลักการออกแบบ ตลอดจนตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของเซ็นเซอร์ในทางปฏิบัติที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไป

ซึ่งรายงานฉบับนี้จะกล่าวถึงตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (temperature Sensor) แบบไดโอดคู่ โดยเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิแบบไดโอดคู่นี้ จะใช้หลักการพื้นฐานของรอยต่อ p-n โดยเมื่อรอยต่อ p-n ได้รับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันตกคร่อมรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จากหลักการนี้เอง ทำให้เราสามารถนำคุณสมบัติของรอยต่อ p-n มาสร้างเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิได้

### 1.1) วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างวงจรรวม
2. เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อพี-เอ็น และนำความรู้นี้ไปประยุกต์เพื่อสร้างเป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบไดโอดคู่
3. เพื่อศึกษาการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมการแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1) เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ

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

การวัดอุณหภูมิโดยทั่วไปมักแสดงระดับของความร้อนหรือเย็นในอุปกรณ์สื่อสารใด ๆ เมื่อเทียบกับระดับอุณหภูมิอ้างอิงซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ได้ตั้งเอาไว้ โดยแสดงผลออกมาในหน่วยของการวัดอุณหภูมิซึ่งมีอยู่ 4 หน่วยการวัด คือ

องศาฟาเรนไฮต์ (Fahrenheit, °F)

องศาเซลเซียส (Celsius, °C)

องศาเคลวิน (Kelvin, °K)

องศาแรงคิน (Rankine, °R)

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

ดังนั้น ในที่นี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ รวมทั้งเทคนิคในการนำเอาสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิไปใช้งานต่อหรือประมวลสัญญาณต่อไปในระบบการวัดหรือระบบควบคุมค่ากระบวนการ เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ใช้กันในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายชนิด ซึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลักการในการตรวจสอบอุณหภูมิที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป โดยอาศัยคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

### 2.1.1) คุณสมบัติการขยายตัวของของเหลว (liquid expansion)

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

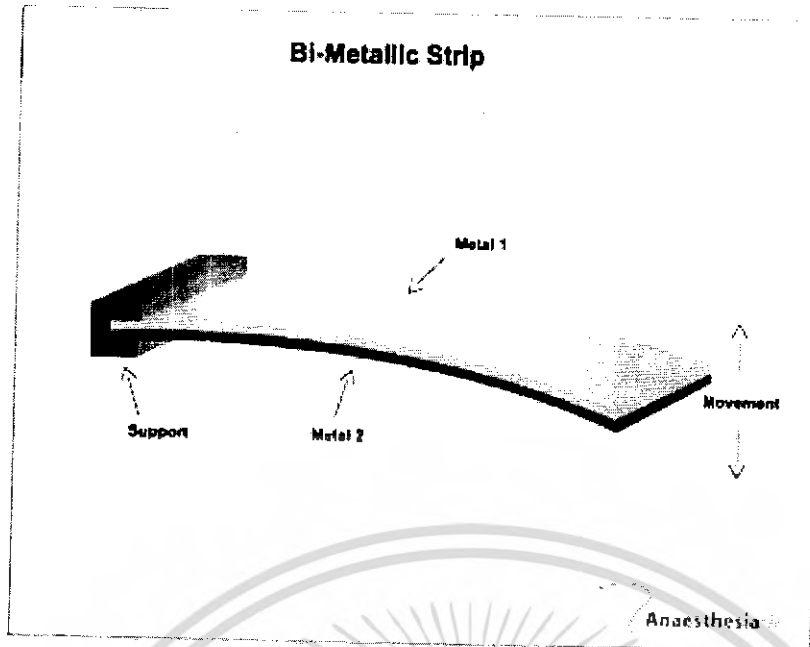


รูปที่ 2.1 แสดงภาพเทอร์โมมิเตอร์แบบ liquid-in-glass

### 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงภาพแผ่นโลหะคู่ bimetallic strip

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

### 2.1.3) คุณสมบัติของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (electrical resistance)

คุณสมบัติของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุตัวนำใด ๆ จะมีการแปรค่าไปตามผลของอุณหภูมิรอบข้าง โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงสามารถเขียนอธิบายได้ด้วยสมการเชิงเส้นดังต่อไปนี้

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

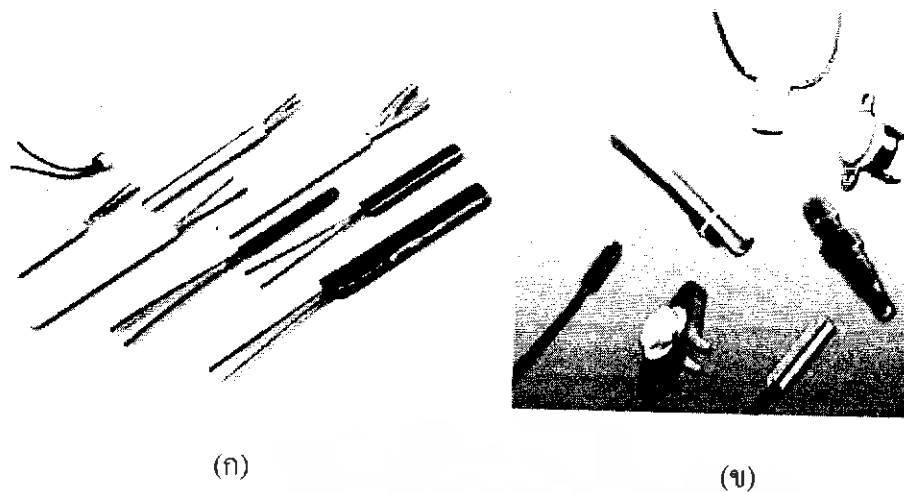
โดยที่  $R_0$  คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุตัวนำที่อุณหภูมิเท่ากับ  $0^\circ\text{C}$  มีหน่วยเป็น โอห์ม ( $\Omega$ )

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

และ  $\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุตัวนำ

เซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ใช้คุณสมบัตินี้ เช่น RTD (resistance temperature detector)

เทอร์มิสเตอร์ (thermistor) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



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

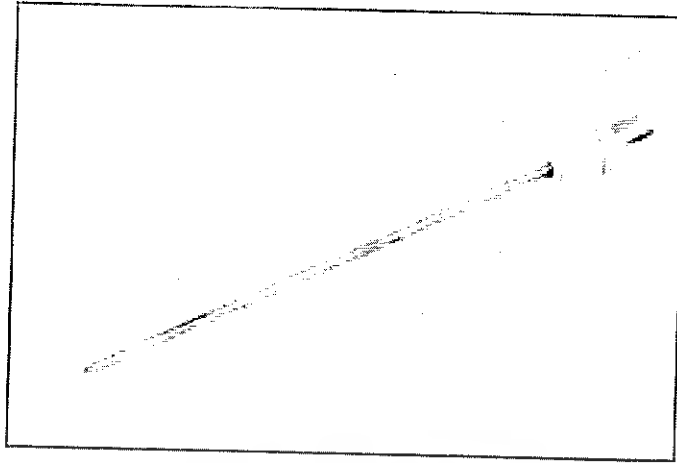
#### 2.1.4) คุณสมบัติของการเปลี่ยนอุณหภูมิเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (thermoelectricity)

คุณสมบัติของการเปลี่ยนอุณหภูมิเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (thermoelectricity) หมายถึงสัญญาณไฟฟ้าซึ่งกำเนิดโดยพลังงานความร้อน 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 แสดงวงจรเทอร์โมคัปเปิลพื้นฐานและลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลในรูปแบบต่างๆ เทอร์โมคัปเปิลซึ่งถูกบรรจุอยู่ในฝาครอบป้องกันจะทำหน้าที่เป็นโพรบ (probe) นำไปยึดติดกับชิ้นงานหรืออุปกรณ์ที่ต้องการตรวจสอบอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่จุดตรวจสอบ (hot junction) กับจุดอ้างอิง (cold junction) แล้ว ด้วยคุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลจึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า e.m.f. หรือแรงดันไฟฟ้า Seebeck ขึ้น (ปกติมีค่าอยู่ในช่วง mV) เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นในวงจร โดยมีขนาดและทิศทางในการไหลขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะตัวนำของเทอร์โมคัปเปิลและค่าของอุณหภูมิที่ต้องการตรวจสอบ โวลต์มิเตอร์ที่ต่อทางด้านปลายอีกด้านหนึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แสดงผลให้กับผู้อ่านซึ่งมีการเปรียบเทียบให้ค่าที่อ่านได้ออกมาอยู่ในรูปหน่วยของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลแบบต่างๆ

เทอร์โมคัปเปิล สามารถนำไปใช้วัดอุณหภูมิของโลหะ ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ โดยมีช่วงการวัดประมาณ  $73^{\circ}\text{K}$  จนถึงมากกว่า  $2,273^{\circ}\text{K}$  ( $-200^{\circ}\text{C}$  จนถึงมากกว่า  $+2,000^{\circ}\text{C}$ ) โดยมีความแม่นยำในการวัดขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะตัวนำที่นำมาทำเป็นเทอร์โมคัปเปิล แต่ทั่วไปจะมีความแม่นยำน้อยกว่าการวัดโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบ 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 และเทอร์โมมิเตอร์ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วไปนั้น จะพบว่าผลตอบสนองของเทอร์มิสเตอร์มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงและมีย่านการวัดแคบ ส่วนเทอร์โมคัปเปิลจะให้ผลตอบสนองค่อนข้างไม่เป็นเชิงเส้น มีย่านการวัดกว้าง แต่สัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีขนาดเล็กมาก ทั้งยังต้องการจุดอ้างอิงอุณหภูมิในการวัดอีกด้วย ในขณะที่ RTD จะมีผลตอบสนองที่มีความเป็นเชิงเส้นแต่ยังคงมีขนาดของสัญญาณเอาต์พุตเล็กมากเช่นกัน ด้วยปัจจัยสำคัญที่เป็นข้อจำกัดในการทำงานของเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิทั้งสามชนิดข้างต้น จึงได้มีการพัฒนานำเอาคุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมาทำในรูปแบบของวงจรรวม (integrated circuit, IC) เพื่อใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ เช่น LM335 , LM34 ,AD592 เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.5.1) ตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดวงจรรวม

ในตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบวงจรรวม วงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น วงจรไบอัส วงจรแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล จะถูกสร้างพร้อมกับตัวทรานซิสเตอร์บนชิปเดียวกัน ตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดวงจรรวมที่รู้จักกันดีคือ ตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่ใช้หลักการของPTATซึ่งจะให้ผลตอบสนองออกมาในรูปของกระแส หรือความต่างศักย์ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์

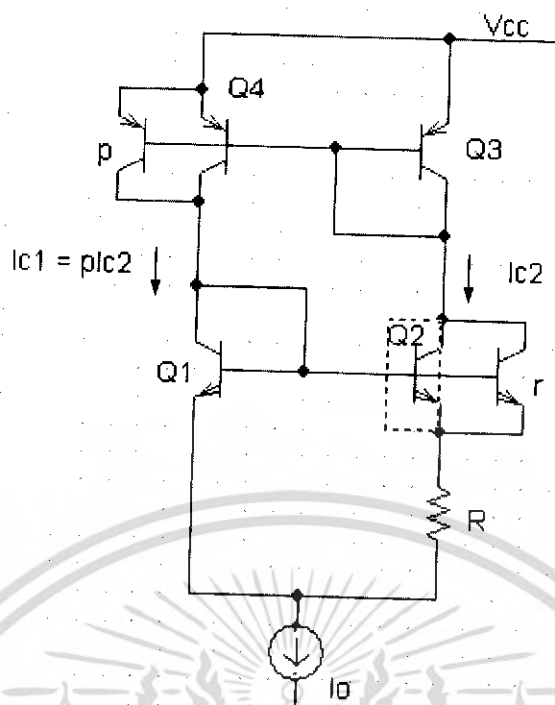
สัญญาณพื้นฐานในตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบPTAT คือความต่างศักย์ $\Delta V_{BE}$ ระหว่างส่วนเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์2ตัว ที่มีสัดส่วนของกระแสแตกต่างกันตามความหนาแน่นของกระแสอิมิตเตอร์ขณะที่อยู่ที่อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งค่าความต่างศักย์ $\Delta V_{BE}$  หาได้จากสมการ(2.2)

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

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

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

จากรูปที่2.5แสดงถึงวงจรพื้นฐานของแหล่งจ่ายกระแสที่ใช้หลักการของPTAT โดยที่ทรานซิสเตอร์Q1และQ2 มีอัตราส่วนพื้นที่ของส่วนอิมิตเตอร์เป็น r และทรานซิสเตอร์Q3และQ4 เป็นวงจรสะท้อนกระแสที่มีอัตราส่วนของกระแสคอลเลกเตอร์ p



รูปที่ 2.5 วงจรพื้นฐานของแหล่งจ่ายกระแสที่ใช้หลักการของPTAT

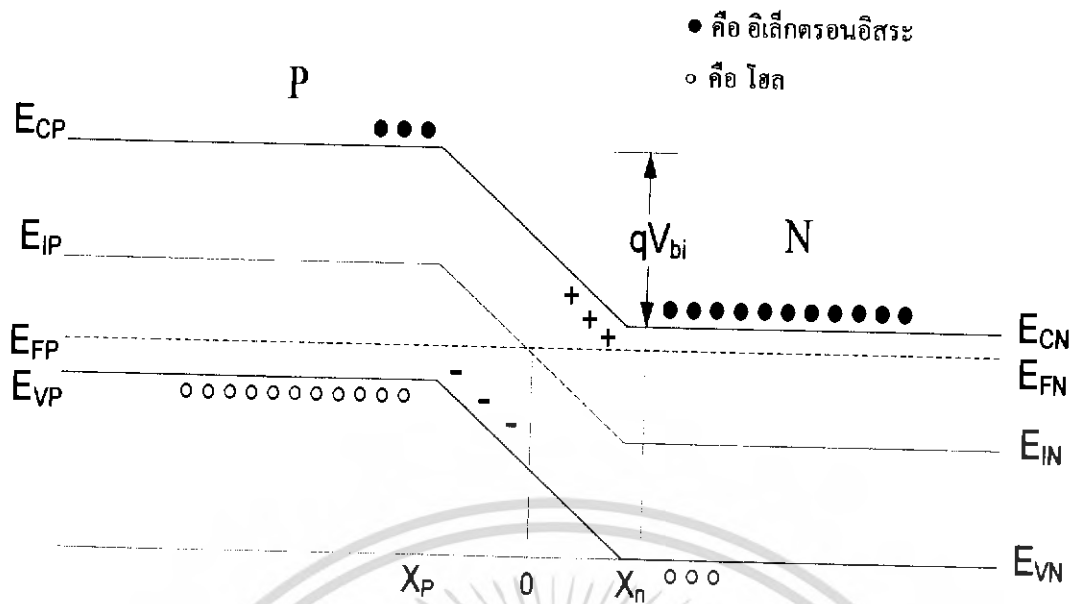
## 2.2) ทฤษฎีรอยต่อ พี-เอ็น

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

### 2.2.1) รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล

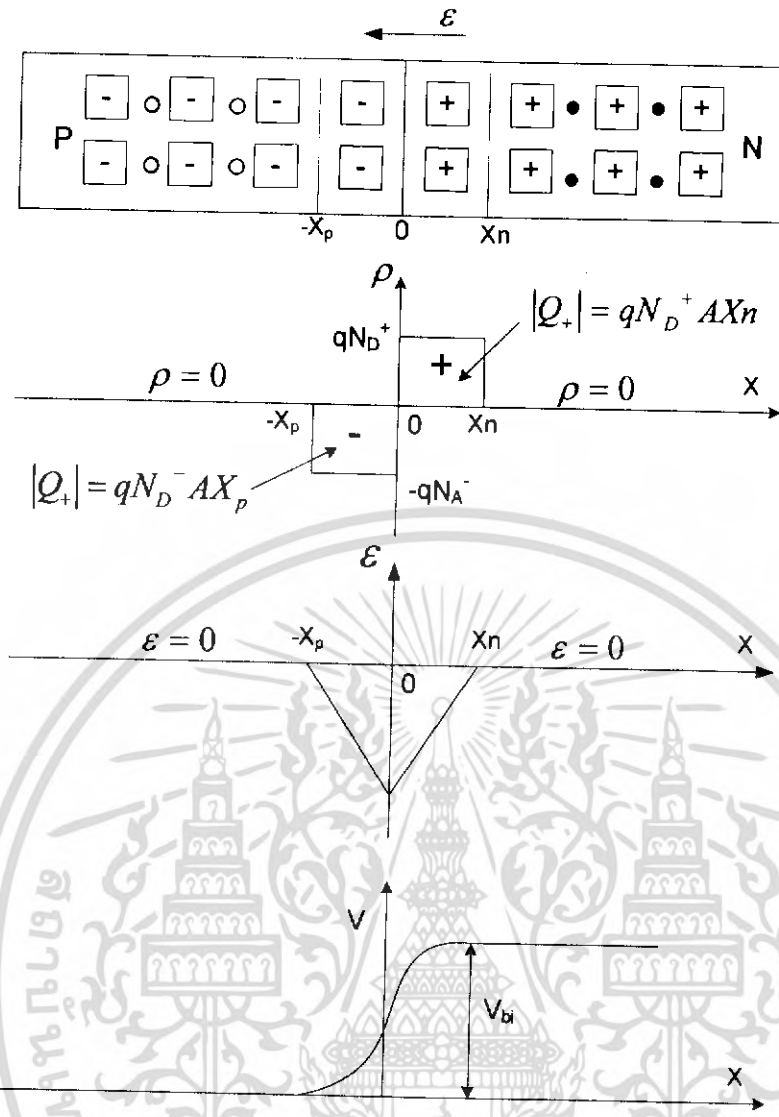
ในเบื้องต้นนี้จะเริ่มพิจารณาถึงรอยต่อพี-เอ็นชนิดขั้นบันได (step junction) ซึ่งจะได้ว่าเนื่องจากความหนาแน่นประจุพาหะของด้านทั้งสองของรอยต่อพี-เอ็นมีค่าไม่เท่ากัน จึงเกิดการแพร่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะ เพื่อให้ด้านทั้งสองมีความหนาแน่นประจุพาหะเท่ากัน โดยอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นจะแพร่ข้ามไปยังด้านพีและโฮลทางด้านพีก็จะแพร่ข้ามไปยังด้านเอ็นซึ่งสามารถพิจารณาได้จากลักษณะแถบ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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ลักษณะแถบพลังงานเมื่อรอยต่ออยู่ในภาวะสมดุล

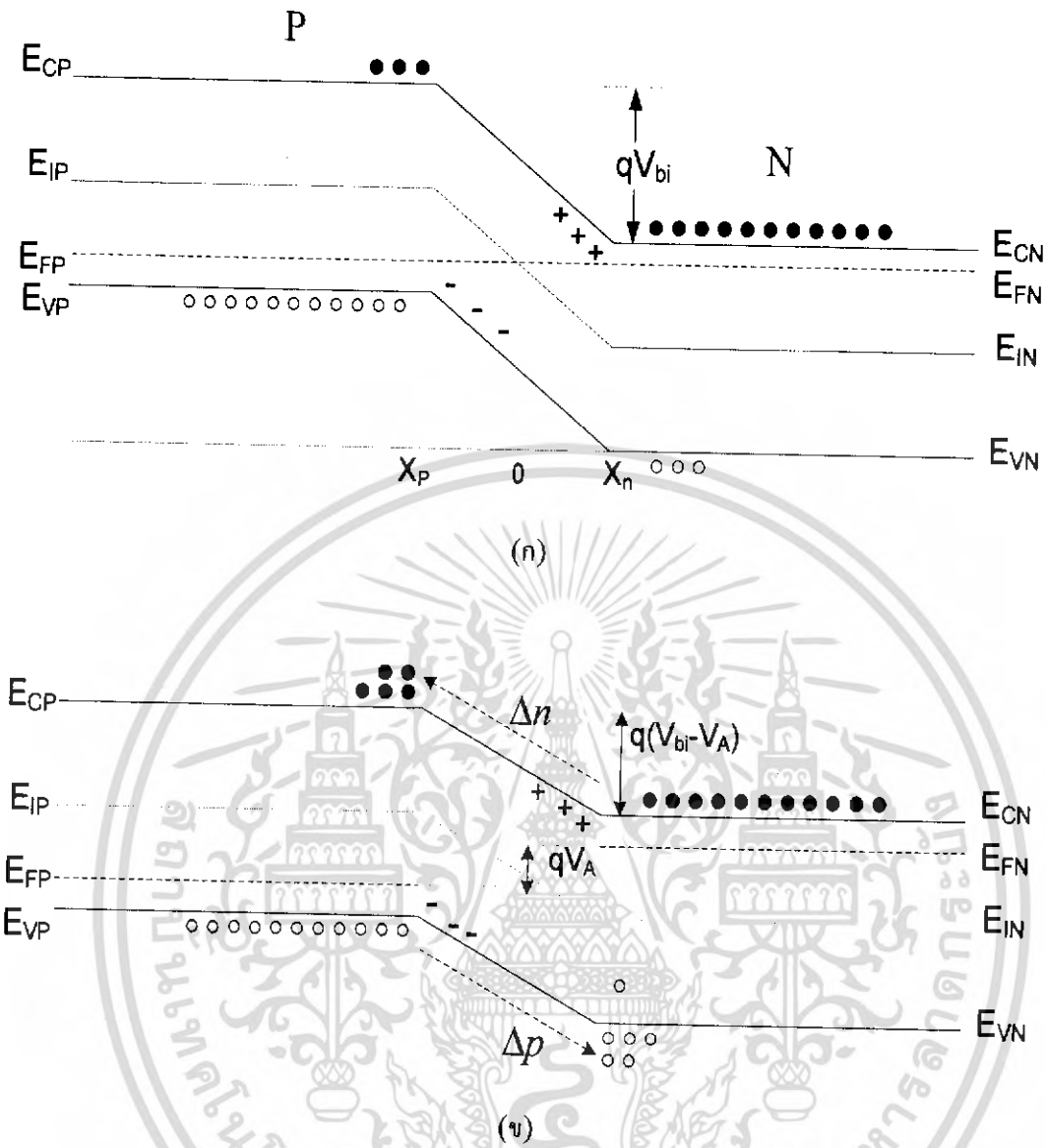
เมื่อเกิดการแพร่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะก็จะทำให้เกิดการรวมตัว (recombination) ระหว่างอิเล็กตรอน-โฮล และทำให้อะตอมสารเจือผู้ให้ทางด้านเอ็นที่บริเวณรอยต่อมีสภาพเป็นไอออนบวก ส่วนอะตอมสารเจือผู้รับทางด้านพีมีสภาพเป็นไอออนลบ ซึ่งประจุไฟฟ้าดังกล่าวทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นบริเวณรอยต่อและเกิดการสะสมประจุไฟฟ้าขึ้นบริเวณรอยต่อ 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

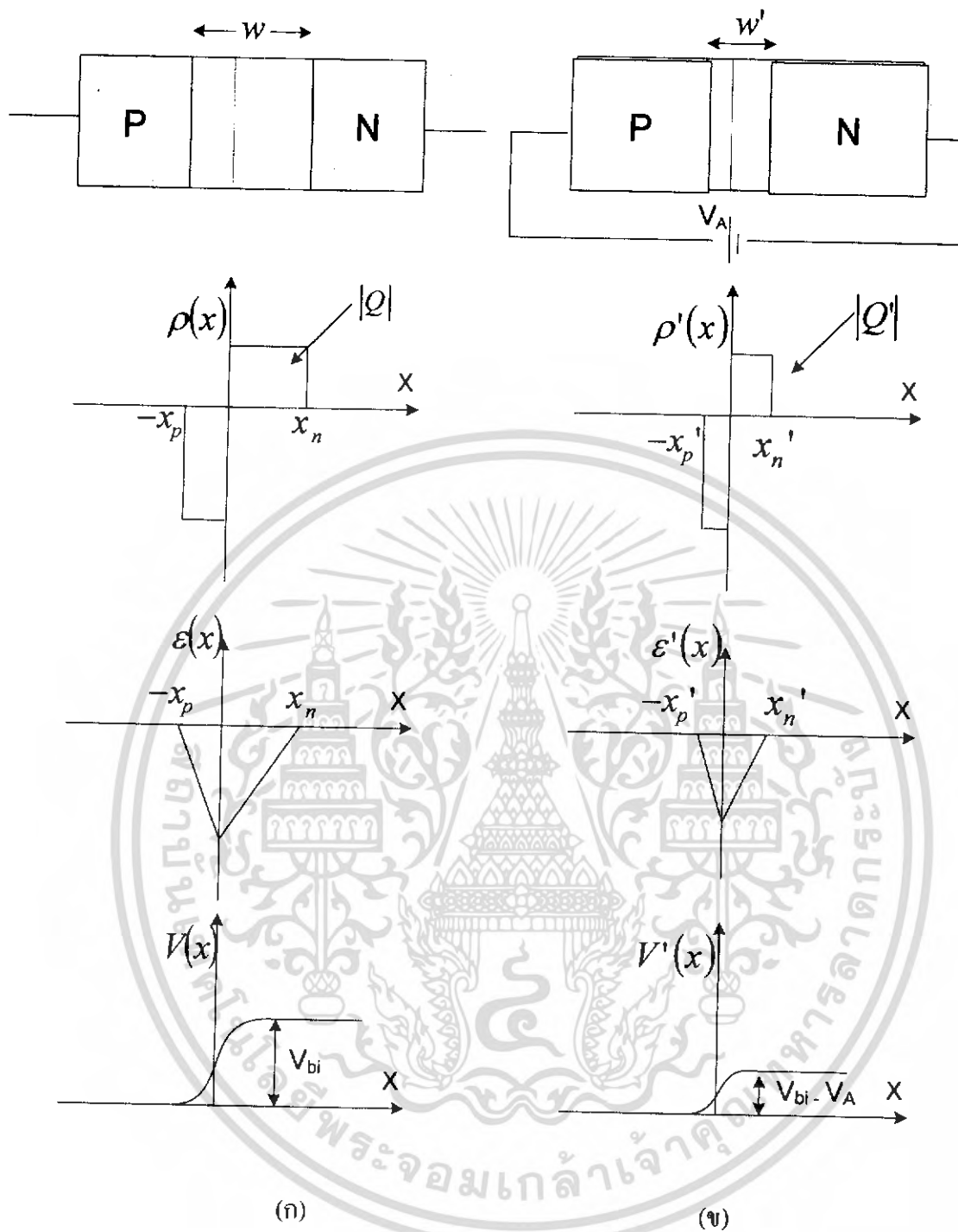
2.2.2) รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

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



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

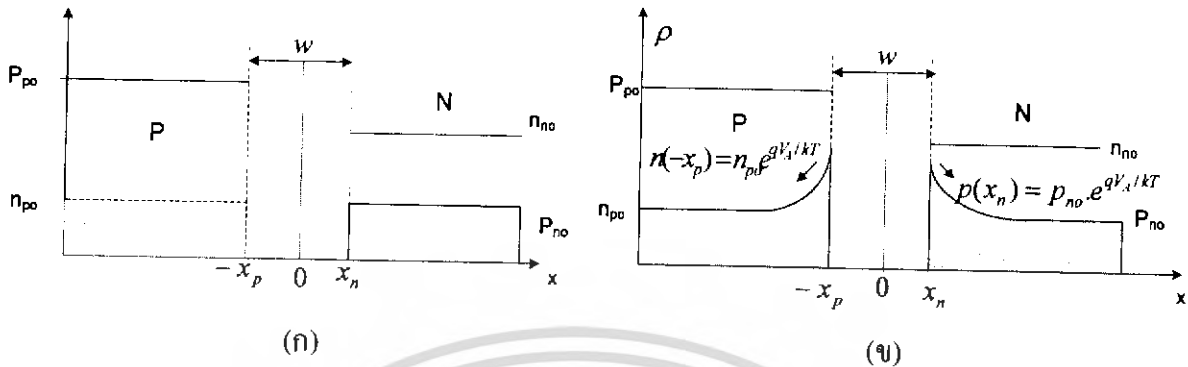
เมื่อเกิดการแพร่ของประจุพาหะก็จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร เรียกว่า กระแสไบอัสตรง และการที่สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อลดลงจะทำให้ขนาดความกว้างบริเวณปลอดพาหะลดลง หรือก็คือการลดลงของประจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อนั่นเอง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการเพิ่มขึ้นของพาหะส่วนน้อยที่ขอบของบริเวณปลอดพาหะอธิบายได้จากสมการกฎของรอยต่อ  $P_{no}$  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

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

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

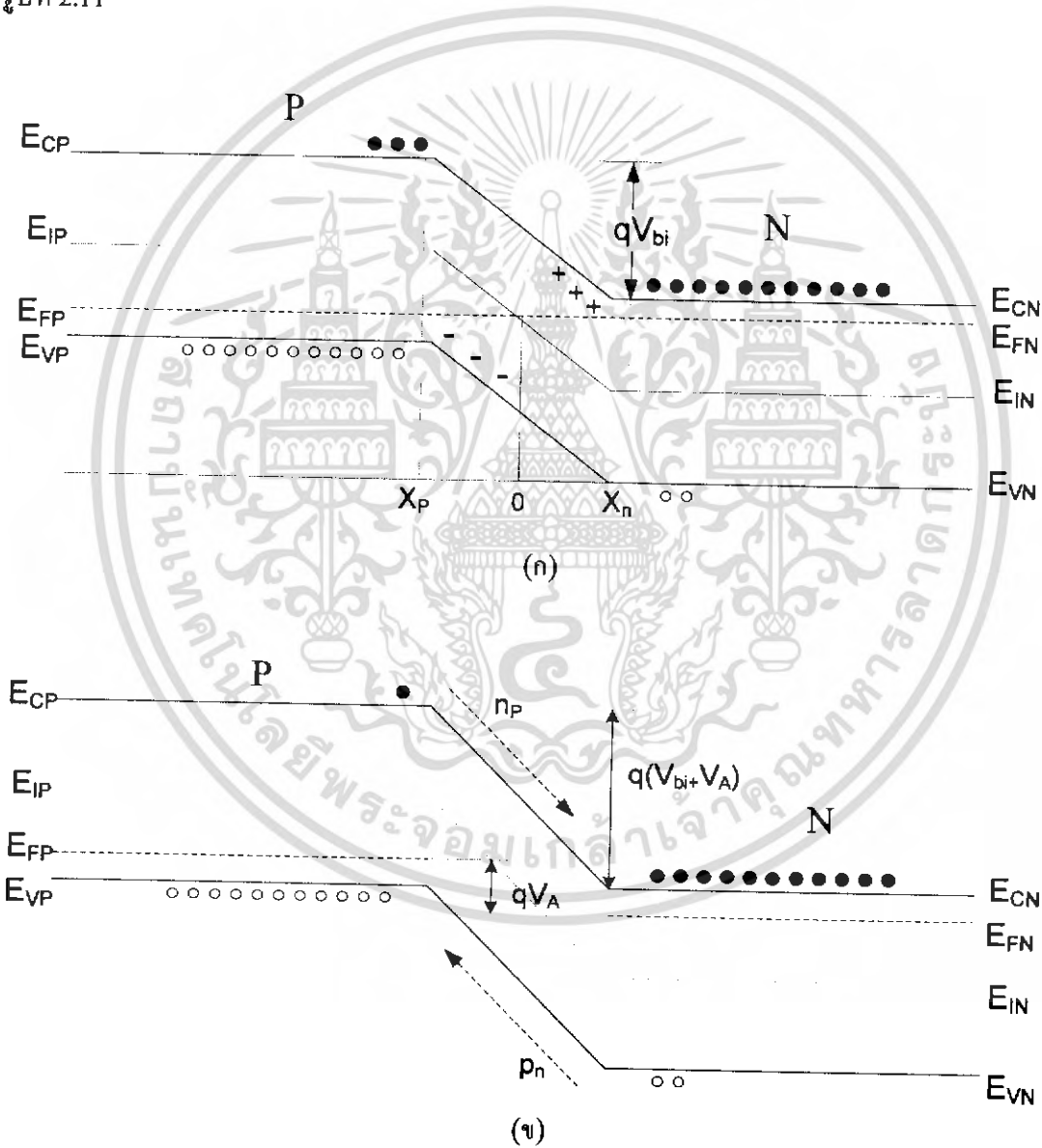
เมื่อ  $N_A$  คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้รับ (อะตอม/ลบ.ซม)

เมื่อ  $N_D$  คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือให้ (อะตอม/ลบ.ซม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3) รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

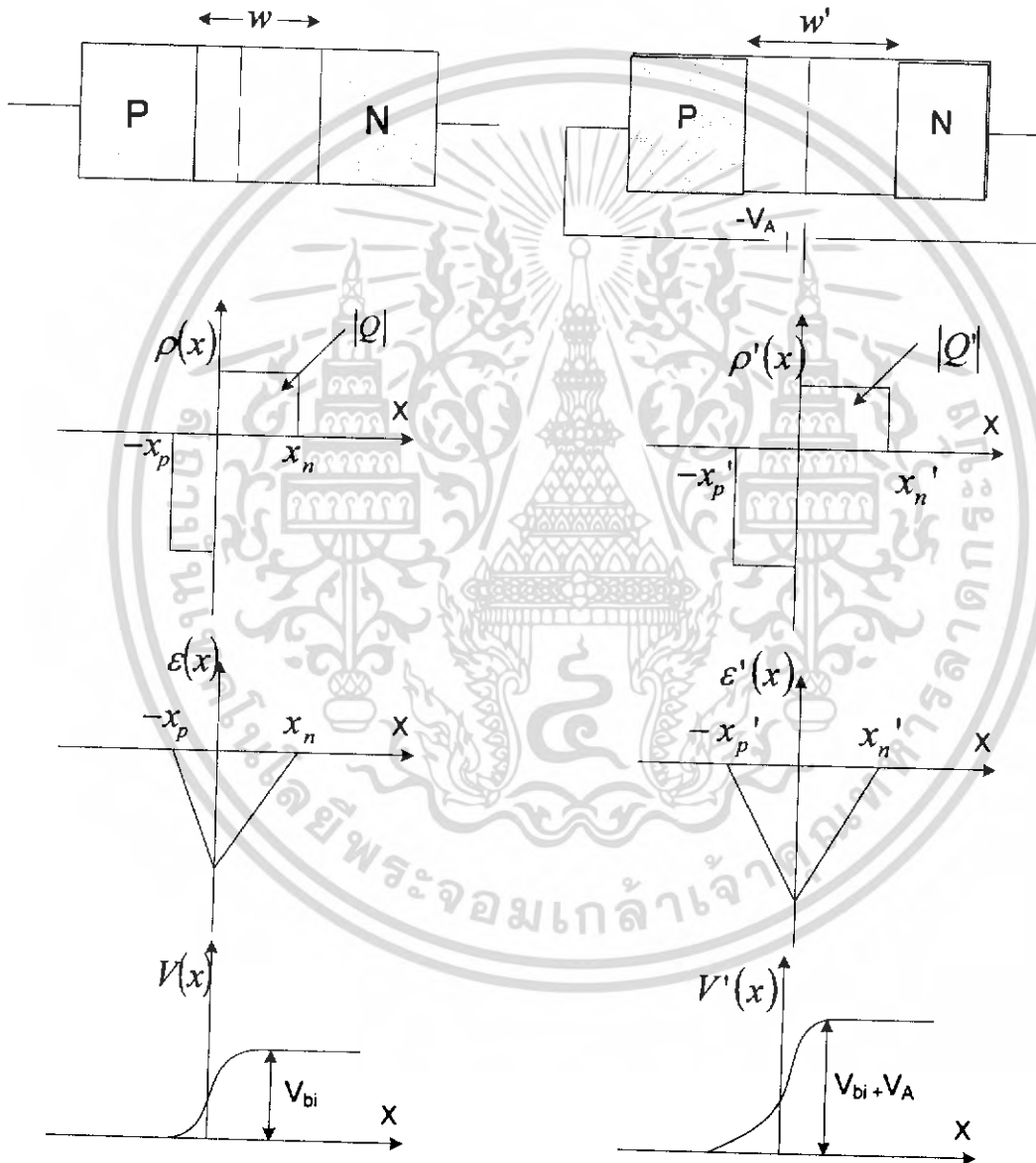
การให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ (Reverse bias :  $-V_A$ ) ทำได้โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าที่ด้านพีเป็นลบ เมื่อเทียบกับด้านเอ็น โดยการกำหนดให้ความต้านทานในส่วนของเนื้อสารกึ่งตัวนำมีค่าน้อยมาก จึงพิจารณาได้ว่าไม่มีแรงดันตกคร่อมในส่วนของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นแรงดัน  $V_A$  ทั้งหมดจะไปปรากฏที่รอยต่อพี-เอ็นและมีทิศทางเดียวกับศักย์ภายในรอยต่อจึงเกิดการเสริมกันของแรงดัน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



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

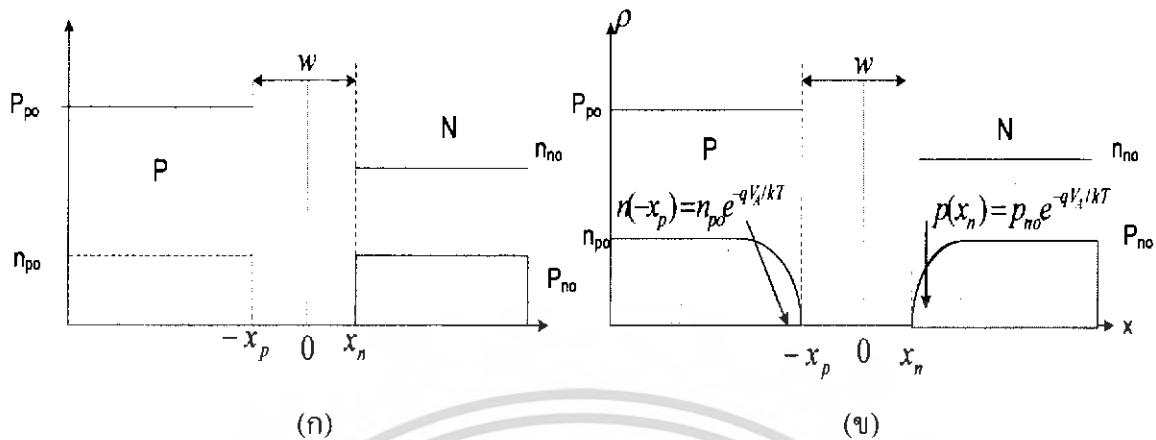
เมื่อกำแพงศักย์เพิ่มขึ้นจึงเกิดการแพร่ของประจุพาหะได้น้อยลง ทำให้โฮลจากด้านพี และ อิเล็กตรอนจากด้านเอ็นไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ มีแต่เพียงพาหะส่วนน้อยเท่านั้นที่สามารถจะเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปได้จึงทำให้เกิดมีกระแสค่าหนึ่งที่มีขนาดน้อยมากไหลผ่านรอยต่อ เรียกกระแสนี้ว่า กระแสอิมิตัวย้อนกลับ และจะพบว่ากรณีที่สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดความกว้างบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้น หรือก็คือการเพิ่มขึ้นของประจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อนั่นเอง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่ออยู่ในภาวะสมดุลกับเมื่อได้รับแรงดันไบอัสไบอัส  $-V_A$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$I_R = -I_0 = -qAn_i \quad (2.6)$$

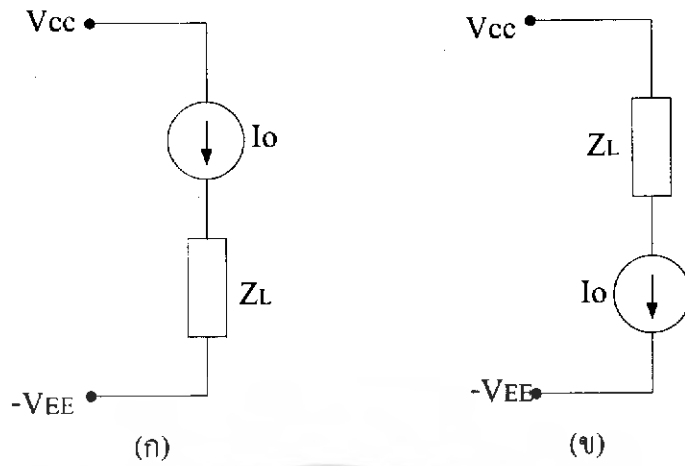
## 2.3) วงจรจ่ายกระแสคงตัว

วงจรจ่ายกระแสคงตัว (Constant current circuits) เป็นวงจรหัวใจสำคัญของ IC โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรที่มีสัญญาณออกและสัญญาณเข้าอยู่ในลักษณะเชิงเส้น (Linear-circuit) เช่น ในวงจรขยายสัญญาณ โอเปอร์เรชันแนลหรือ Op-Amp วงจรขยายสัญญาณผลต่างหรือ Diff Amp วงจรคูณสัญญาณ เป็นต้น ดังนั้นจะเริ่มกล่าวถึงคุณสมบัติของวงจรจ่ายกระแสคงตัวอย่างละเอียดในบทนี้ เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะการทำงานของวงจรรอยอย่างแท้จริง

### 2.3.1) ความหมายของวงจรจ่ายกระแสคงตัว

วงจรจ่ายกระแสคงตัวจะทำหน้าที่ควบคุมกระแสที่ไหลผ่านโหลด ให้มีค่าคงตัวตามที่ต้องการเสมอ แม้ว่าค่าโหลดจะเปลี่ยนแปลงก็ตาม โหลดของเราในที่นี้ก็อาจเป็นได้ทั้ง Passive และ Active จากรูปที่ 2.14 (ก) แสดงสัญลักษณ์ของวงจรจ่ายกระแสคงตัวแบบดันกระแสผ่านโหลด (Constant current source) กระแสที่ไหลออกจากวงจรมีค่าคงตัวเสมอ (เท่ากับ  $I_0$ ) แม้ว่าค่าโหลดเปลี่ยนแปลงไป ส่วนรูปที่ 2.14 (ข) แสดงสัญลักษณ์ของวงจรจ่ายกระแสคงตัวแบบดึงกระแสผ่านโหลด (Constant current sink) ซึ่งในกรณีนี้กระแสจะไหลผ่านโหลดก่อนที่จะกลับเข้าสู่วงจรดึงกระแสคงตัว ทิศทางของลูกศรในรูปแสดงถึงทิศทางกระแส

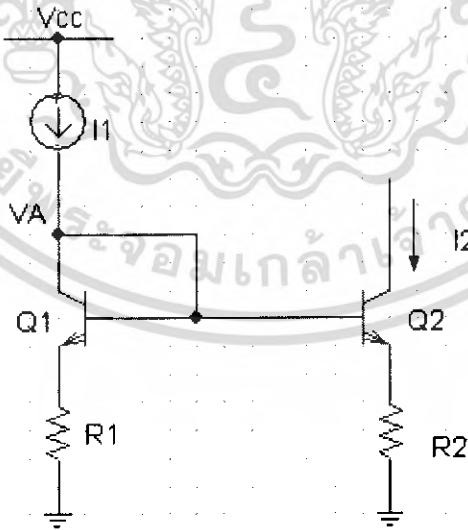
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 (ก) แสดงสัญลักษณ์ของวงจรต้นกระแสคงตัว  
(ข) แสดงสัญลักษณ์ของวงจรดึงกระแสคงตัว

2.3.2) วงจรดึงกระแสคงที่ ที่ใช้ความต้านทานในการไบอัส

จากวงจรจ่ายกระแสคงตัวจะถูกนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแสในวงจรนี้ โดยจะใช้ความต้านทานที่ต่อกับอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัว ในการปรับอัตราส่วนของกระแสไหลคดและกระแสเปรียบเทียบ โดยที่ทรานซิสเตอร์ทั้งสองมีพื้นที่อิมิตเตอร์เท่ากัน ดังเช่นที่แสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงวงจรดึงกระแสคงที่โดยใช้ความต้านทานในการปรับอัตราส่วน  
กระแส I1 และ I2

72110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพิจารณาต่อไปนี้จะสมมติว่า  $h_{FE}$  สำหรับทรานซิสเตอร์ทั้งสองมีค่าสูงมาก ดังนั้น จึงถือว่ากระแสเบสเป็นศูนย์ และ

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

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

ดังนั้น จากกรุปเราจะได้ว่า

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

และ

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

จากสมการ (2.9) (2.10) เราจะได้

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

ซึ่งในกรณีที่ความต่างศักย์คร่อมความต้านทาน  $R_1$  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) จะได้ว่าค่าประมาณ

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

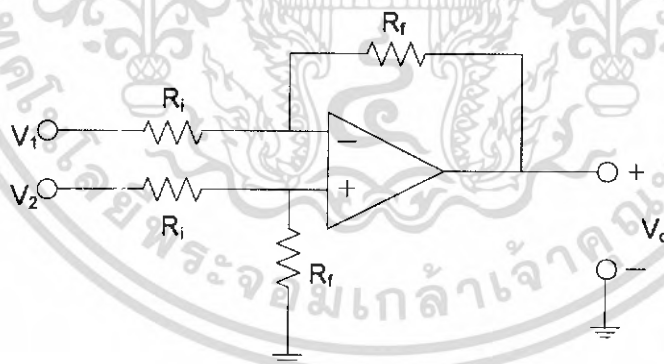
เราจะสังเกตได้ว่าค่าของ  $I_2$  ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  เท่านั้น ไม่ขึ้นอยู่กับค่าสัมบูรณ์ของความต้านทาน ซึ่งการออกแบบวงจรแบบนี้ นับได้ว่ามีความเหมาะสมอย่างมากสำหรับ IC ทั้งนี้เพราะค่าสัมบูรณ์ของความต้านทาน จะควบคุมให้ถูกต้องได้ยากมาก โดยมากค่าสัมบูรณ์มักจะเปลี่ยนแปลงได้ถึง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

## 2.4) วงจรขยายสัญญาณผลต่าง

วงจรขยายสัญญาณผลต่างแสดงได้ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งเป็นวงจรขยายสัญญาณอีกชนิดหนึ่งที่ให้แรงดันเอาต์พุตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าผลต่างของแรงดันอินพุตสองจุดที่ป้อนให้กับวงจร ซึ่งสามารถเขียนอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

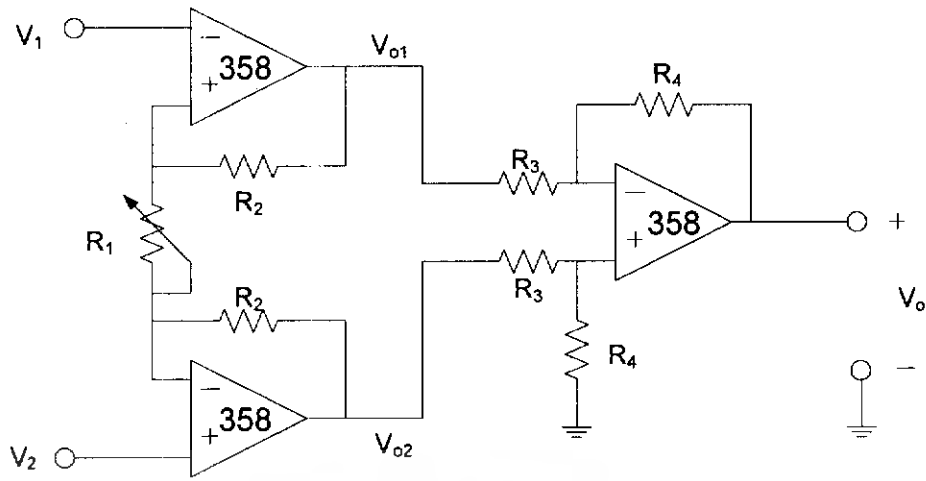
$$V_o = \frac{R_f}{R_i} (V_2 - V_1) \quad (2.15)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 วงจรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์

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

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

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

หรือ  $(V_{o2} - V_{o1}) = \left( 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) (V_2 - V_1)$  (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  $A_v = \frac{V_o}{(V_2 - V_1)} = \left( 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) \left( \frac{R_4}{R_3} \right)$  (2.22)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

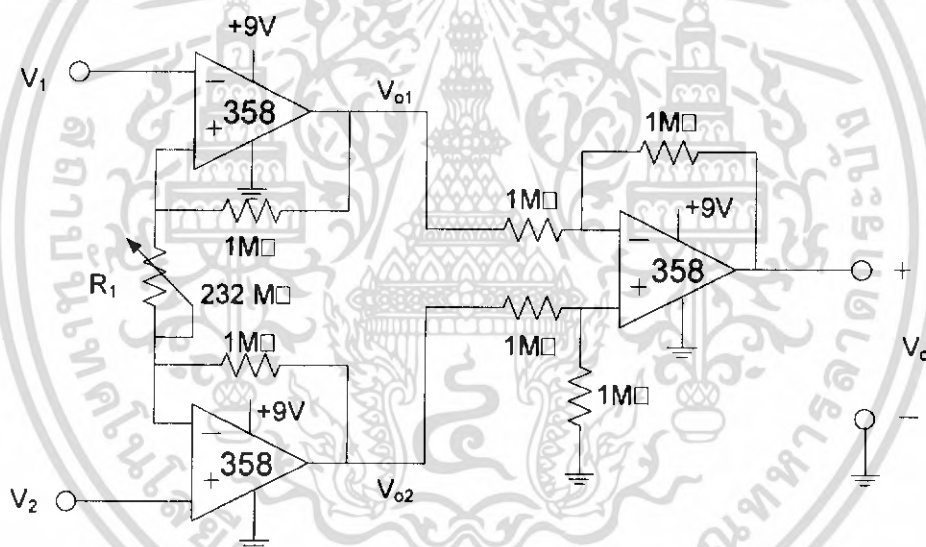
ในการปรับแต่งอัตราขยายแรงดันของวงจรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ทำโดยการเลือกค่า  $R_2$ ,  $R_3$  และ  $R_4$  ให้คงที่ แล้วทำการปรับค่า  $R_1$  เพื่อให้ได้อัตราขยายตามที่ต้องการ

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

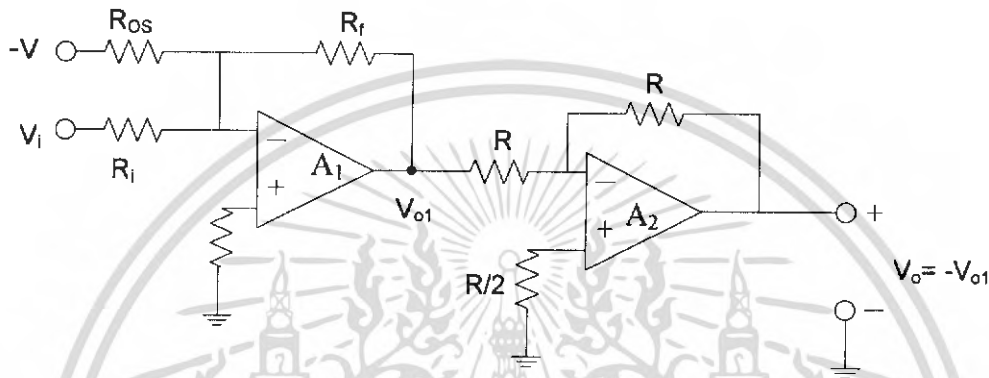


รูปที่ 2.18 วงจรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5) วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์

วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์เป็นวงจรที่มีความสำคัญวงจรหนึ่งในระบบเครื่องมือวัดและคุมค่ากระบวนการ โดยทำหน้าที่ส่งผ่าน และปรับแต่งสัญญาณ ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับอินพุตให้มีความสัมพันธ์เป็นไปตามเงื่อนไขที่ระบบต้องการ ซึ่งวงจรนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงความชัน และปรับตำแหน่งศูนย์ ของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณอินพุต



รูปที่ 2.19 วงจรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง

วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์และกราฟคุณสมบัติระหว่างแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  กับแรงดันอินพุต  $V_i$  ที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.19 ซึ่งประกอบด้วยวงจรรวมสัญญาณ  $A_1$  และวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส  $A_2$  ที่มีอัตราขยายเท่ากับ  $-1$  ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตของ  $A_1(V_{o1})$  จึงมีค่าเท่ากับ

$$V_{o1} = -\left[ \frac{R_f}{R_i} V_i + \frac{R_f}{R_{OS}} V \right] \quad (2.22)$$

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

$$V_o = V_{o2} = (-1)V_{o1} = \left( \frac{R_f}{R_i} V_i + \frac{R_f}{R_{OS}} V \right) \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยจากวงจรที่ใช้ในการทดลองในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ ค่าแรงดันเมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์ออกมาแล้วจะมีค่าประมาณ 1.9 – 2.92 V ซึ่งจะนำไปผ่านวงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่มีค่าระหว่าง 0 – 5 V

วิธีการคำนวณเพื่อหาค่าความต้านทานที่ใช้ในวงจรแสดงได้ดังนี้ โดยจากวงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ ความชันที่ต้องการคือ

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

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

$$\therefore R_f \cong 490k\Omega$$

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

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

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

$$b = -9.31V$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกไฟเลี้ยงเป็น -9 V

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

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

$$R_{OS} \cong 473 \text{ k}\Omega$$

และ

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

$$= 490 \text{ k}\Omega // 100 \text{ k}\Omega // 473 \text{ k}\Omega$$

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

## 2.6) PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์

PIC คือ microcontroller อีกตระกูลหนึ่ง ย่อมาจากคำว่า **P**eripheral **I**nterface **C**ontroller ซึ่งข้อดีของ microcontroller ตระกูลนี้ก็คือ พยายามรวมเอาการทำงานทุกอย่างเอาไว้ภายในตัว ไม่ว่าจะ เป็น 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 ถิ่นแบ่งออกตามชนิดของ Program Memory แบ่งได้เป็น 3 แบบคือ

#### 1. OTP (one time programmable)

OTP เป็น chip ที่มีราคาถูกที่สุดในสามประเภท สาเหตุก็มาจากว่า 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 จะมีการออกแบบกระจกเพื่อให้เห็นแสง uV สามารถส่องผ่านเข้าไปในตัว chip ได้ แต่ก็มีจำนวนครั้งในการลบโปรแกรมเช่นกัน เมื่อลบโปรแกรมด้วยแสง uV มากๆ เข้าก็จะเกิดอาการด้าน คือโปรแกรมไม่เข้านั่นเอง จะมีตัวอักษร JW หรือสามารถดูได้จากการมีกรอบกระจกอยู่บน chip หรือไม่

## 3. EEPROM / Flash (electronically erasable programmable ROM)

EEPROM / Flash เป็น chip ที่ออกมาล่าสุด ส่วนของ program memory สามารถอ่านหรือเขียนด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า ใช้เวลาในการ ลบข้อมูลไม่กัวินาที 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

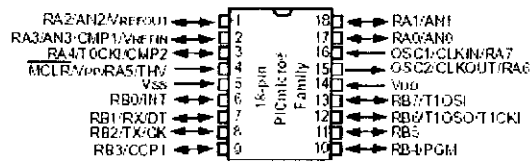
- PIC12CXXX, PIC12FXXX (FLASH MCUs)
- PIC16C5X
- PIC16CXXX
- PIC17CXXX
- PIC16FXXX (FLASH MCUs)
- PIC18CXXX, PIC18FXXX (FLASH MCUs)

### PIC16C5X

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

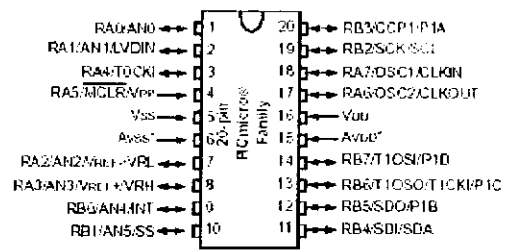
ของ microchip

18-pin PICmicro<sup>®</sup> MCU Family



|             |            |           |           |
|-------------|------------|-----------|-----------|
| PIC16C620A  | PIC16CE625 | PIC16C710 | PIC16F84A |
| PIC16CR620A | PIC16F627  | PIC16C711 | PIC16F84B |
| PIC16C621A  | PIC16F628  | PIC16C712 | PIC16F849 |
| PIC16C622A  | PIC16F627A | PIC16C715 | PIC16F887 |
| PIC16CE623  | PIC16F628A | PIC16C716 | PIC16F888 |
| PIC16CE624  |            |           |           |

20-pin PICmicro<sup>®</sup> MCU Family



|            |           |             |
|------------|-----------|-------------|
| PIC16C717* | PIC16C771 | PIC18F1220* |
| PIC16C770  | PIC16C778 | PIC18F1320* |
|            | PIC16C782 |             |

\*18 pin device; Avss and AvDD are not wired 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

พบว่าคุณสมบัติเพิ่มขึ้น 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 อยู่ภายในด้วย แต่ในส่วนของ PROGRAM memory ยังเป็น OTP และ EPROM อยู่

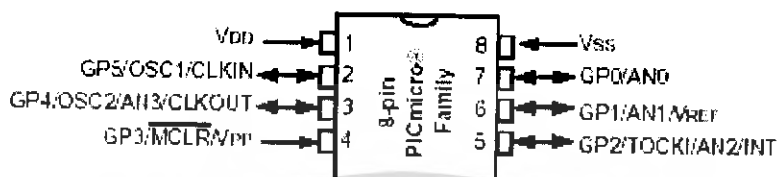
PIC12CXXX และ PIC12FXXX

- 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 ( แต่หาก

ต้องการความแม่นยำของเวลาก็จำเป็นต้องใช้ Crystal oscillator ภายนอก)

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

### 8-pin PICmicro<sup>®</sup> MCU Family



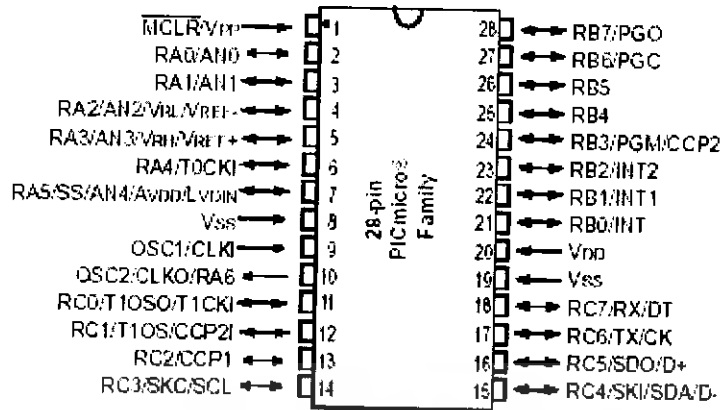
|             |            |            |
|-------------|------------|------------|
| PIC12C508A  | PIC12CE519 | PIC12CE673 |
| PIC12C509A  | PIC12C671  | PIC12CE674 |
| PIC12CR509A | PIC12C672  | PIC12F629  |
| PIC12CE518  |            | PIC12F675  |

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 เพราะเป็นชิปยุคแรกๆ ที่มี PROGRAM MEMORY เป็นแบบ FLASH และมี DATA MEMORY ที่เป็น EEPROM เพิ่มเติมเข้ามา รวมทั้งตัว PROGRAM CHIP สามารถสร้างได้ง่าย ชิปที่ออกมาตอนแรกก็ได้แก่ PIC16F83, PIC16F84 หลังจากนั้นได้ออกตระกูล PIC16F87X ซึ่งถือว่าเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่ เพราะมี In Circuit Debugger อยู่ภายในทำให้ ไม่จำเป็นต้องพึ่ง Emulator ที่มีราคาแพงอีกต่อไป ซึ่งเป็นผลให้ CHIP ในตระกูลนี้ และ PIC16F87X นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง

28-pin PICmicro<sup>®</sup> MCU Family

|           |            |            |
|-----------|------------|------------|
| PIC16C62B | PIC16F76   | PIC18C242  |
| PIC16CR63 | PIC16C642  | PIC18C252  |
| PIC16C63A | PIC16C745  | PIC18F2220 |
| PIC16C65  | 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 MCU)**

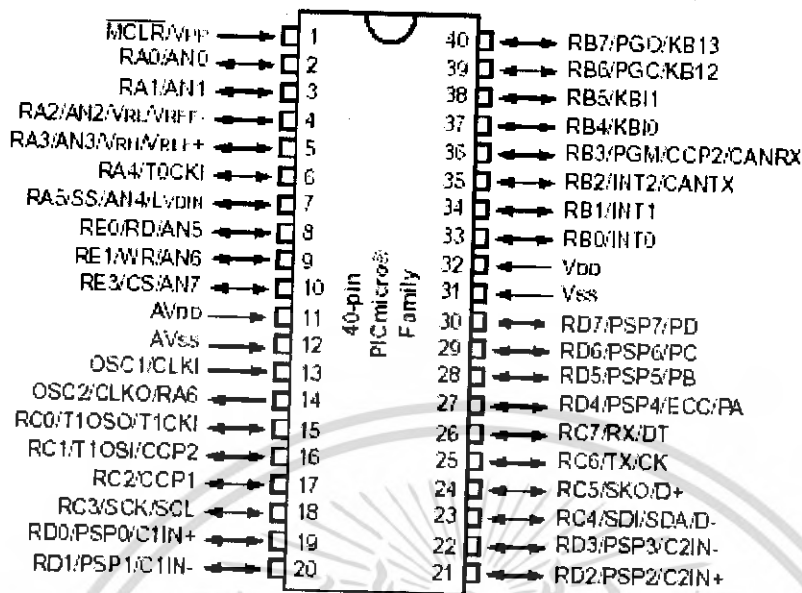
- มีคำสั่งในภาษา assembly 35 คำสั่ง
- มี I/O, มี Timer มากกว่า 1 ตัว, Watch dog, I2C, USART, SPI, PWM
- มี A/D ขนาด 10 bits
- มี Program memory เป็นแบบ Flash ทำให้สามารถโปรแกรมใหม่ได้หลายครั้ง
- มี EEPROM ภายใน
- ในตระกูล 16F87X สนับสนุน In Circuit Debugger (ICD) เป็นผลทำให้ไม่จำเป็นต้องซื้อ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 40-pin PICmicro<sup>®</sup> MCU Family



|           |            |            |
|-----------|------------|------------|
| PIC16C855 | PIC16C765  | PIC18F4220 |
| PIC16C65B | PIC16C774  | PIC18F1320 |
| 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  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.3 โครงสร้างของ 16F876A PIC Microcontroller

### 2.6.3.1 คุณสมบัติของ PIC16F876A

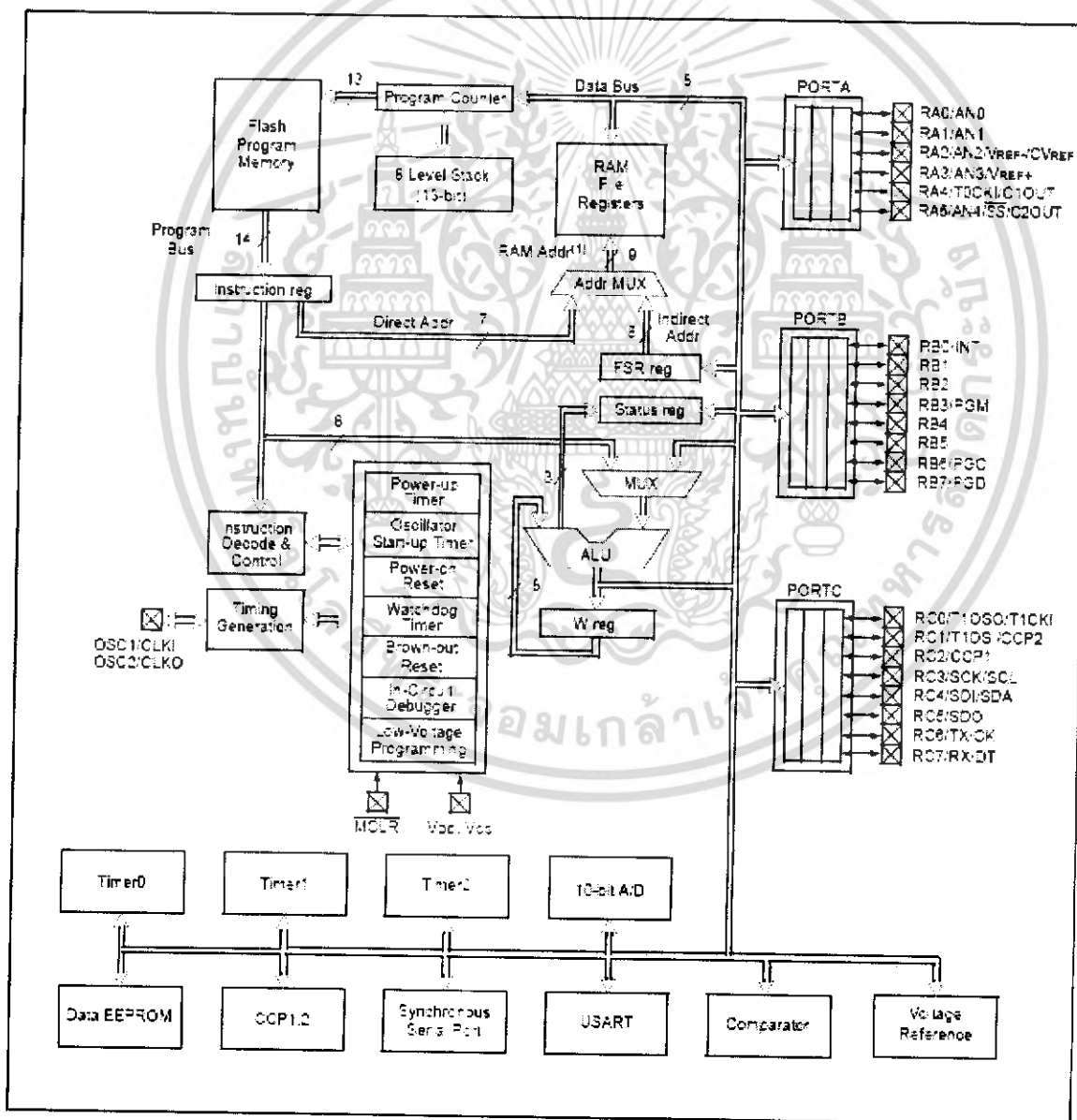
สำหรับในปริิณยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ 16F876A ในการทำการทดลอง ดังนั้นจะขอกล่าวถึงเพียงแบบเดียว โดยคุณสมบัติที่สำคัญของ PIC เบอร์นี้ มีดังนี้

- ซึ่พ็ยเป็นแบบ RISC (Reduced Instruction Set) มีคำสั่งให้ใช้งาน 35 คำสั่ง
- คำสั่งหนึ่ง ๆ ใช้เวลาทำงาน 1 ถึง 2 Cycle
- ทำงานได้สูงสุดที่ 20 kHz
- สัญญาณนาฬิกามีหลายโหมดให้เลือกใช้งาน
  - โหมด RC ใช้วงจรภายในไมโครคอนโทรลเลอร์กำเนิดสัญญาณนาฬิกา
  - โหมด LP ใช้คริสตอลพลังงานต่ำ ความถี่สูงสุดไม่เกิน 200 Khz
  - โหมด XT ใช้คริสตอลความถี่ตั้งแต่ 100 Khz – 4 Mhz
  - โหมด HS ใช้คริสตอลความถี่สูง 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
- คอบสนองกับอินเทอร์รัพท์ได้ 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) และสามารถเลือกระดับการป้องกันได้
- มีโหมดประหยัดพลังงาน
- สามารถโปรแกรมด้วยไฟ +5 VDC ได้
- สามารถโปรแกรมแบบ In-Circuit Serial Programming

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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 ช่องนำเข้ามาในตัว
- มีระบบ USART สำหรับการสื่อสารแบบอนุกรม
- มีระบบตรวจระดับไฟเลี้ยง BODEN (Brown-Out Detection) เพื่อสร้างสัญญาณรีเซตซีพียู BOR (Brown-Out Reset)

### 2.6.3.2 โครงสร้างการทำงานภายในของ PIC16F876A



รูปที่ 2.24 แผนผังการทำงานภายในของ PIC 16F876A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของขา PIC 16F876A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

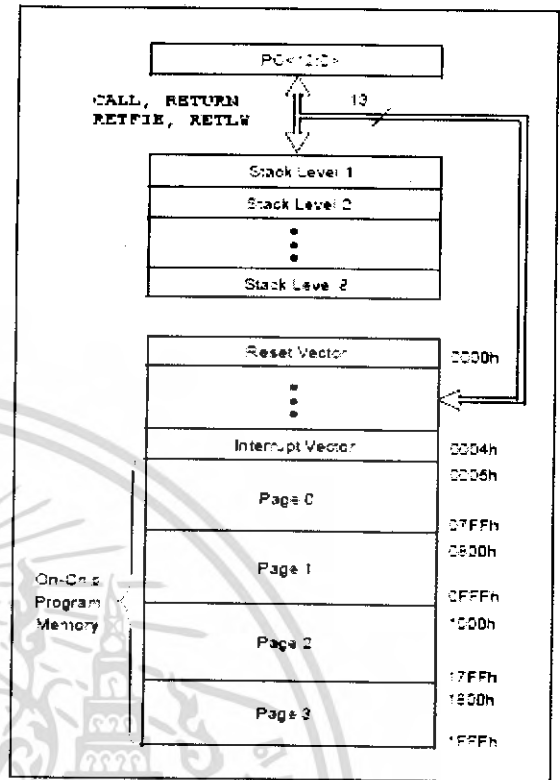
ตารางที่ 2.1 (ต่อ) รายละเอียดของขา PIC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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 เท่านั้นแต่ถ้าเมื่อต้องการกระโดดจาก 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-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 จะต้องเลือกรีจิสเตอร์ 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. <sup>(1)</sup> 00h     | Indirect addr. <sup>(1)</sup> 80h     | Indirect addr. <sup>(1)</sup> 100h     | Indirect addr. <sup>(1)</sup> 180h     |
| TMR0 01h                              | OPTION_REG 81h                        | TMR0 101h                              | OPTION_REG 181h                        |
| PCL 02h                               | FCL 82h                               | PCL 102h                               | FCL 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 185h                             |
| PORTC 07h                             | TRISC 87h                             |  |  |
| PORTD <sup>(1)</sup> 08h              | TRISD <sup>(1)</sup> 88h              |  |  |
| PORTE <sup>(1)</sup> 09h              | TRISE <sup>(1)</sup> 89h              |  |  |
| FC_LATH 0Ah                           | PCLATH 8Ah                            | FC_LATH 104h                           | PCLATH 18Ah                            |
| INTCON 05h                            | INTCON 85h                            | INTCON 105h                            | INTCON 185h                            |
| PIR <sup>*</sup> 0Ch                  | PIE1 8Ch                              | EEDATA 10Ch                            | ECON <sup>2</sup> 18Ch                 |
| PIR2 0Dh                              | PIE2 8Dh                              | EEADR 10Dh                             | ECON2 18Dh                             |
| TMR1L 0Eh                             | PCON 8Eh                              | EEDATH 10Eh                            | Reserved <sup>(2)</sup> 18Eh           |
| TMR1H 0Fh                             |                                       | EEADRH 10Fh                            | Reserved <sup>(2)</sup> 18Fh           |
| T1CON 10h                             |                                       |  |  |
| TMR2 11h                              | SSPCON2 91h                           |  |  |
| T2CON 12h                             | PR2 92h                               |  |  |
| SSPBUF 13h                            | SSPAD0 93h                            |  |  |
| SSPCCON 14h                           | SSPSTAT 94h                           |  |  |
| CCPR1L 15h                            |                                       |  |  |
| CCPR1H 16h                            |                                       |  |  |
| CCP1CON 17h                           |                                       |  |  |
| RCSTA 18h                             | TXSTA 95h                             | General Purpose Register 16 Bytes 117h | General Purpose Register 16 Bytes 187h |
| TXREG 19h                             | SPBRG 99h                             |  |  |
| RCREG 1Ah                             |                                       |  |  |
| CCPR2L 1Bh                            |                                       |  |  |
| CCPR2H 1Ch                            | CMCON 9Ch                             |  |  |
| CCP2CON 1Dh                           | CVRCON 9Dh                            |  |  |
| ADRESH 1Eh                            | ADRESL 9Eh                            |  |  |
| ADCON0 1Fh                            | ADCON1 9Fh                            |  |  |
|                                       |                                       |  |  |
| General Purpose Register 96 Bytes 7Fh | General Purpose Register 80 Bytes ADh | General Purpose Register 80 Bytes 120h | General Purpose Register 90 Bytes 1A0h |
|                                       | accesses 7Ch-7Fh EFh                  | accesses 7Ch-7Fh 16Fh                  | accesses 70h-7Fh 1F0h                  |
| Bank 0                                | Bank 1                                | Bank 2                                 | Bank 3                                 |

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  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3.5 รีจิสเตอร์หลักของ PIC16F876A

#### รีจิสเตอร์ Configuration word

มีขนาด 14 bits อยู่ที่ Address 2007h ใน Program Memory โดยการทำงานเบื้องต้นของ 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 ของหน่วยความจำข้อมูล 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 ทำงานครบเวลาที่กำหนด  
 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 4<sup>th</sup> low order bit of the result occurred  
 0 = No carry-out from the 4<sup>th</sup> 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

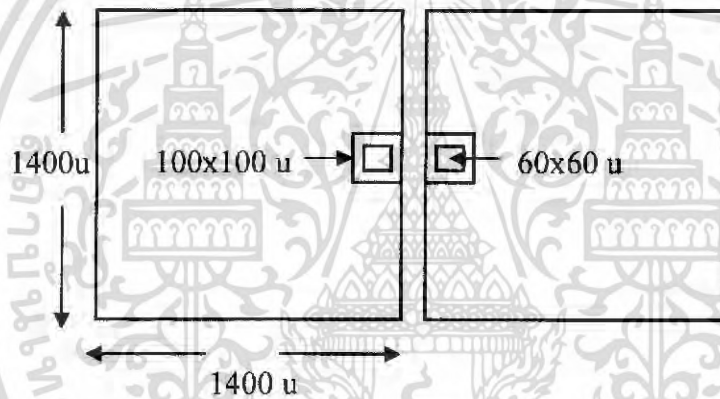
## บทที่ 3

### กระบวนการสร้างไดโอดชนิดรอยต่อ พี-เอ็น

กระบวนการสร้างไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นมีดังนี้คือ

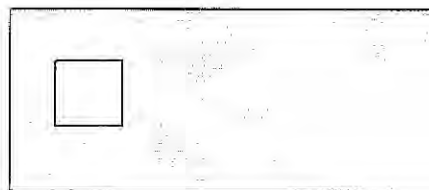
ขั้นตอนแรกคือการออกแบบมาสก์ (Mask) เพื่อที่จะนำไปใช้เป็นตัวแบบในการสร้างไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น โดยการออกแบบมาสก์นี้จะใช้โปรแกรม CorelDraw ช่วยในการออกแบบ

โดยในการออกแบบนั้น จะต้องกำหนดขนาดส่วนต่างๆของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นที่จะสร้างก่อน ซึ่งจะให้ขนาดของสารเจือพีและเอ็นมีขนาด  $100 \times 100 \text{ u}$  และขนาดของช่องคอนแท็ค  $60 \times 60 \text{ u}$  โดยมีขนาดของอะลูมิเนียม  $1400 \times 1400 \text{ u}$  ดังรูปที่ 3.1



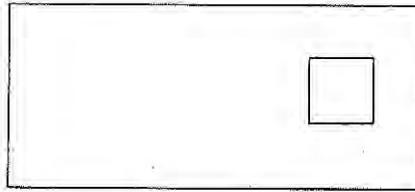
รูปที่ 3.1 ขนาดของไดโอดที่ออกแบบ

หลังจากได้กำหนดขนาดไว้แล้ว ก็จะนำไปออกแบบโดยใช้ โปรแกรม CorelDraw ซึ่งในการสร้างพี-เอ็น ไดโอดนั้นจะต้องใช้มาสก์ทั้งหมด 4 มาสก์ ประกอบไปด้วยมาสก์แรกคือการแพร่สารเจือชนิดพี มาสก์ที่ 2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น มาสก์ที่ 3 การเปิดช่องคอนแท็ค มาสก์ที่ 4 การสร้างขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะแสดงได้ดังรูป 3.2 – 3.5

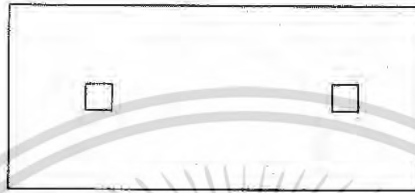


รูปที่ 3.2 มาสก์ที่ 1 การแพร่สารเจือชนิดพี

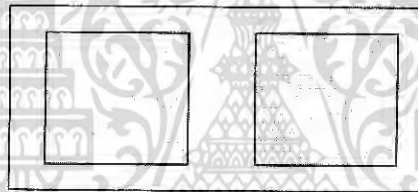
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 มาส์คที่ 2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น



รูปที่ 3.4 มาส์คที่ 3 การเปิดช่องคอนแท็ค



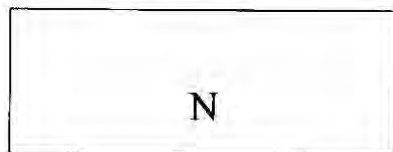
รูปที่ 3.5 มาส์คที่ 4 การสร้างขั้วไฟฟ้า

### ขั้นตอนการสร้างไดโอดชนิด พี-เอ็น

แบ่งได้เป็นขั้นตอนย่อยๆ ได้ดังนี้

(1) แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น (initial wafer)

- แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ระบาย(100)
- ค่าพิคัดความต้านทาน 3-6  $\Omega$ -cm
- ขนาดความหนาของแผ่นผลึกประมาณ 400  $\mu$ m



รูปที่ 3.6 แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (2) การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิกอนครั้งแรก

การทำความสะอาดผิวหน้าเป็นการล้างสิ่งเจือปน สารแขวนลอย คราบไขมัน รวมทั้งซิลิกอนไดออกไซด์ที่ผิวซึ่งเป็นโลหะหนัก เพื่อให้แผ่นซิลิกอนสะอาดและพร้อมที่จะนำไปใช้งาน โดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

### 2.1) กำจัดฝุ่น

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

### 2.2) กำจัดเศษโลหะ

- ต้มในกรดไนตริก ( $HNO_3$ ) 2 แก้วๆ ละ 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 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

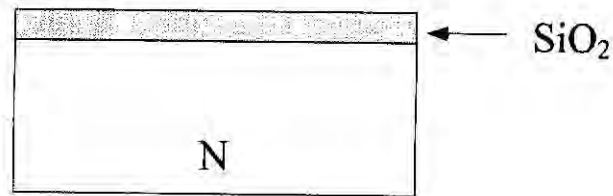
- จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

## (4) กระบวนการออกซิเดชันครั้งที่ 1

การสร้างออกไซด์ในขั้นตอนนี้เพื่อเป็นส่วนป้องกันในการแพร่สารเจือ โดยความหนาของชั้นออกไซด์มีค่า 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

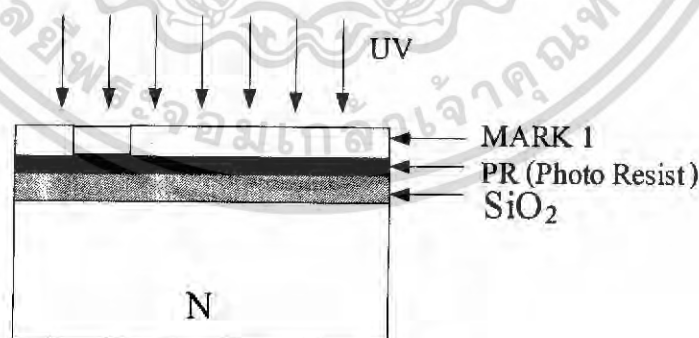


รูปที่ 3.7 แผ่นผลึกซิลิคอนหลังการออกซิเดชันครั้งที่ 1

(5) กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 1

การใช้มาส์คที่ 1 เป็นต้นแบบในการเปิดช่องชั้นออกไซด์เพื่อไปสู่ขั้นตอนในการแพร่สารเจือ ต่อไป

- อบแผ่นไว้ที่ความชื้นที่ 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 N<sub>2</sub>
  - อบฟิล์มที่ 90 °C 20 นาที (Postbake)

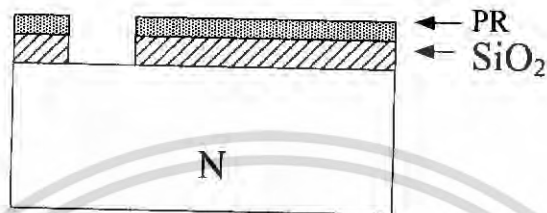


รูปที่ 3.8 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (6) การใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มในสารละลาย Buffer 5 นาที อัตราการ Etching 1000Å/นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 2
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$



รูปที่ 3.9 การสกัดชั้นออกไซด์

## (7) กระบวนการลอกฟิล์ม

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



รูปที่ 3.10 กระบวนการลอกฟิล์ม

## (8) การทำความสะอาดผิวหน้า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (9) การ Slight Etching

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

## (10) กระบวนการ Pre-deposition

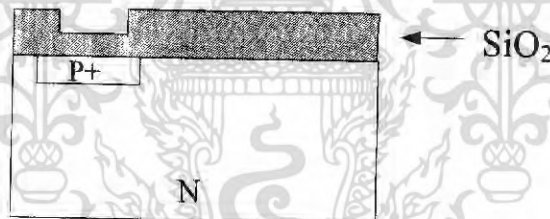
- Boron deposition Temp 1000 °C 20 นาที
- Flow  $N_2$  1000 cc/min

## (11) ลอกชั้น Boron grass

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

## (12) กระบวนการ Drive-in

- Boron drive-in Temp 1000 °C
- Dry  $O_2$  1200 cc/min ที่เวลา 40 นาที



รูปที่ 3.11 กระบวนการขับลึกอะตอมสารเจือชนิดพี

## (13) กระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 2

การที่ใช้มาส์ค ที่ 2 เพื่อเป็นต้นแบบในการเปิดออกไซด์บริเวณเข้าสัมผัส

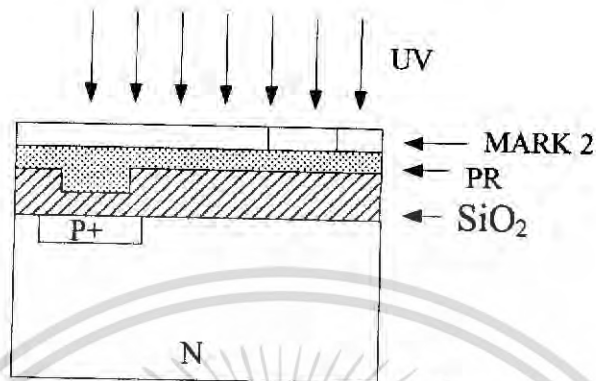
- อบแผ่น ไล่ความชื้นที่ 85 - 90°C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ) spin 3000 rpm
- อบฟิล์มที่ 90 °C 20 นาที (Prebake)
- Alignment Expose (UV 10 วินาที)
- Develop ฟิล์ม โดย

จุ่มใน AZ Developer แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที

จุ่มใน AZ Developer แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

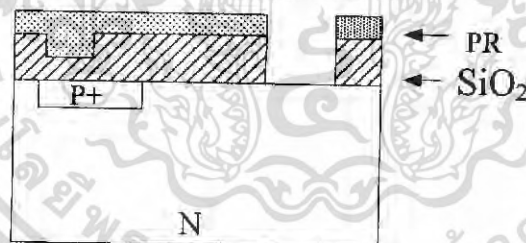
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 2
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$
- อบฟิล์มที่  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  20 นาที (Postbake)



รูปที่ 3.12 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 2

(14) การใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

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

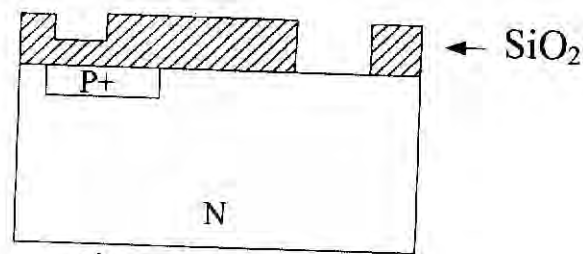


รูปที่ 3.13 การสกัดชั้นออกไซด์

(15) กระบวนการลอกฟิล์ม

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 กระบวนการลอกฟิล์ม

## (16) การทำความสะอาดผิวหน้า

- คัดใน 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) กระบวนการ Pre-deposition

- Phosphorus deposition Temp  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  20 นาที
- Flow  $N_2$  1000 cc/min

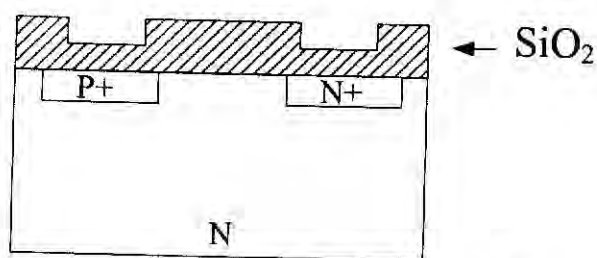
## (19) ลอกชั้น Phosphorus grass

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

## (20) กระบวนการ Drive-in

- Phosphorus drive-in Temp  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Dry  $O_2$  1200 cc/min ที่เวลา 40 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 กระบวนการจับถักอะตอมสารเจือชนิดเอ็น

(21) กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 3

การที่ใช้มาส์ค ที่ 2 เพื่อเป็นต้นแบบในการเปิดออกไซด์บริเวณหัวสัมผัส

- 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

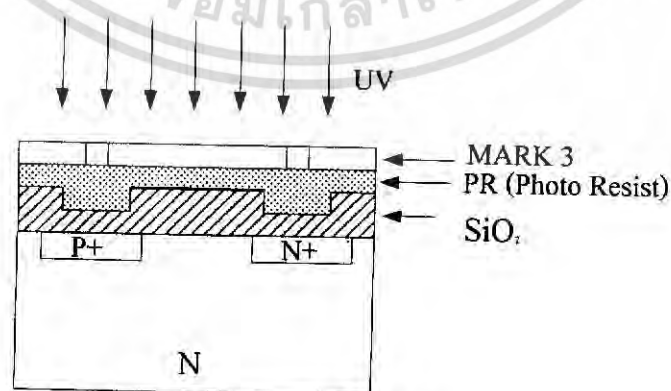
จุ่มใน AZ Developer แก้วที่สอง 30 วินาที

จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 1

จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 2

เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>

- อบฟิล์มที่ 90 °C 20 นาที (Postbake)

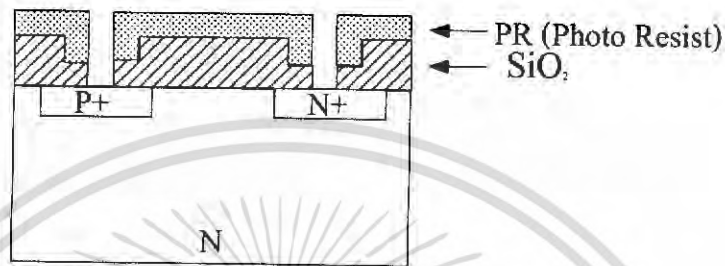


รูปที่ 3.16 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (22) การใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

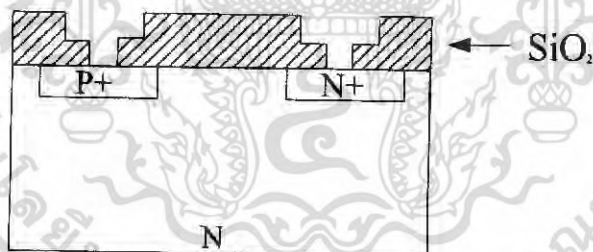
- จุ่มในสารละลาย Buffer
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 2
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$



รูปที่ 3.17 การสกัดชั้นออกไซด์

## (23) กระบวนการลอกฟิล์ม

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



รูปที่ 3.18 กระบวนการลอกฟิล์ม

## (24) การทำความสะอาดผิวหน้า

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

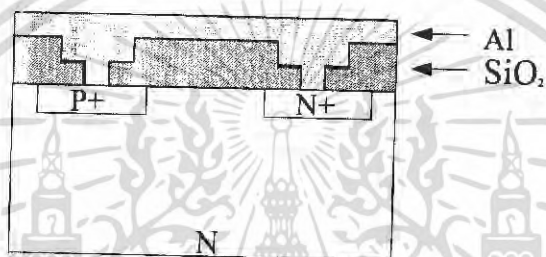
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (25) การ Slight Etching

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

## (26) การเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศ

โดยกระบวนการ Thermal Evaporation ที่ความดัน  $3 \times 10^{-6}$  Torr ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยอะลูมิเนียม



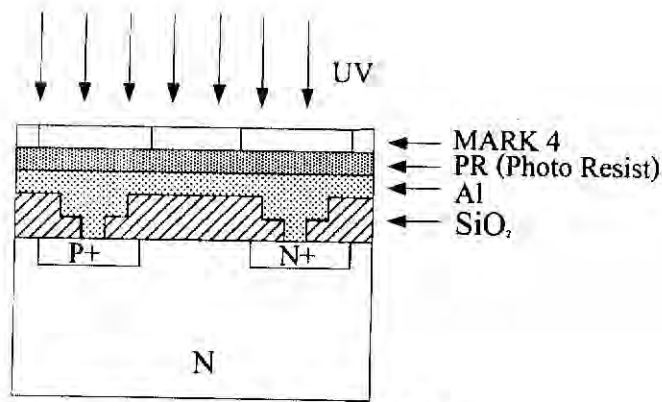
รูปที่ 3.19 การเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศ

## (27) กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 4

การใช้มาส์คที่ 3 เพื่อเป็นต้นแบบในการสร้างขั้วโลหะ

- อบแผ่น ไล่ความชื้นที่ 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  $N_2$
- อบฟิล์มที่ 90 °C 20 นาที (Postbake)

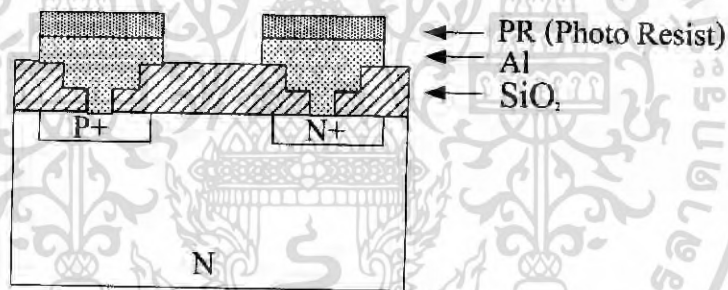
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 4

(28) การสกัดชั้นอะลูมิเนียม (Al- Etching)

- จุ่มในสารละลาย Al-Etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40°C
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่ 2
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>

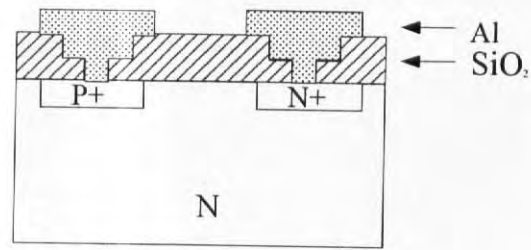


รูปที่ 3.21 การสกัดชั้นอะลูมิเนียม

(29) กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มใน Acetone 2 แก้วๆ ละ 1 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว จนสะอาด
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>

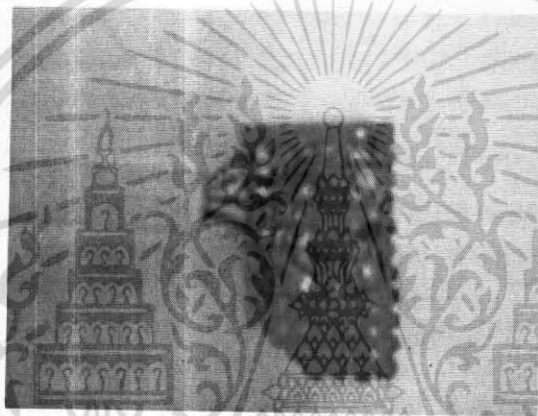
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



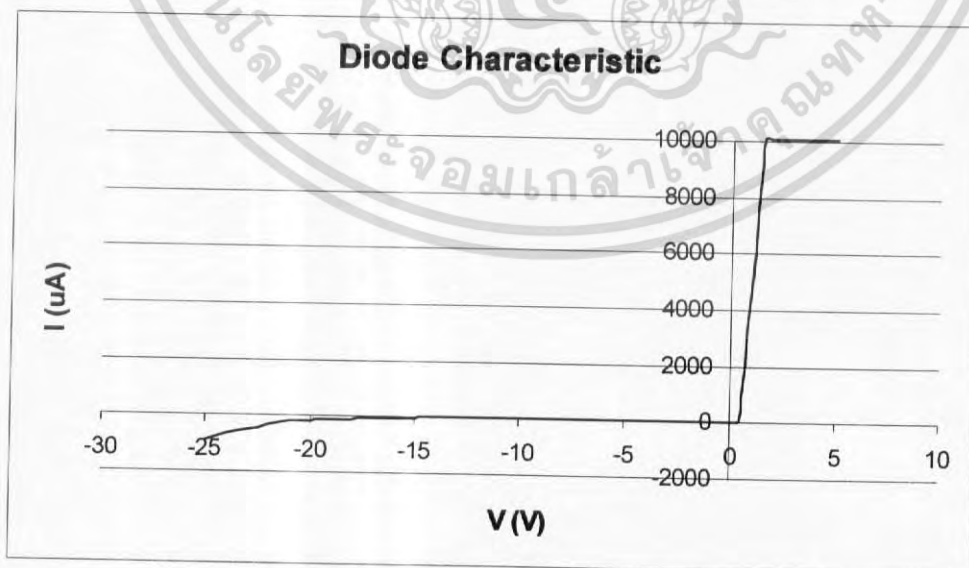
รูปที่ 3.22 กระบวนการลอกฟิล์ม

(30) กระบวนการ Sintering Temp 500°C

- Dry N<sub>2</sub> 1000 cc/min 12 นาที



รูปที่ 3.23 หัววัดอุณหภูมิแบบไดโอดคู่ที่สร้างขึ้น



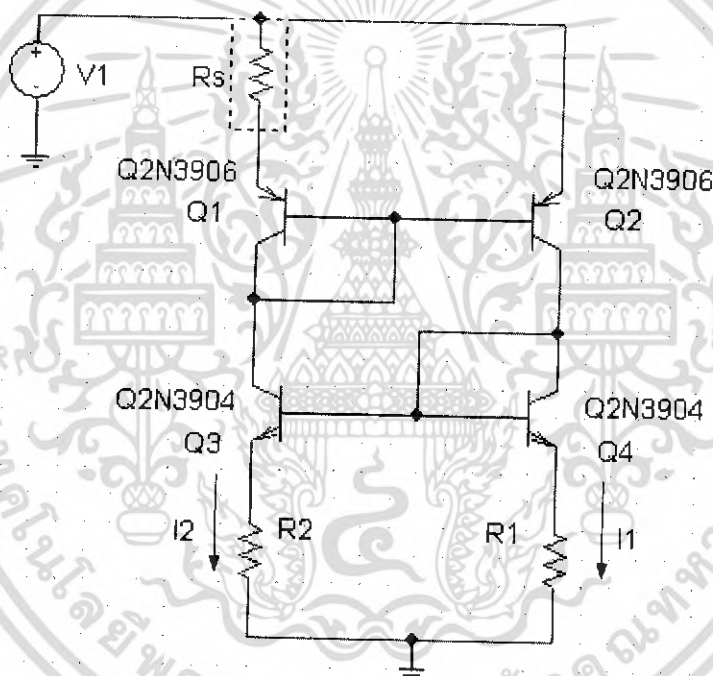
รูปที่ 3.24 คุณลักษณะของกระแส-แรงดัน ของไดโอดที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

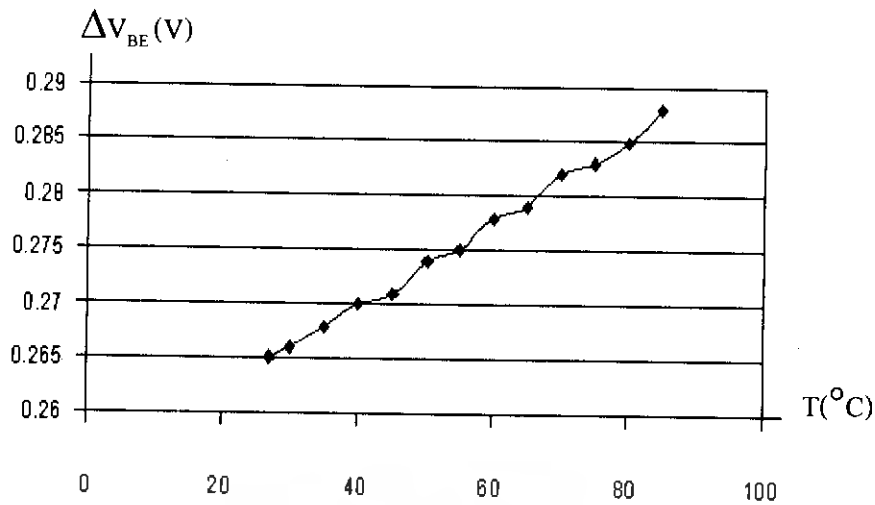
ในขั้นตอนแรก ต้องศึกษาในส่วนของวงจรแหล่งจ่ายกระแสคงที่โดยการต่อวงจรดังรูปที่ 4.1 ซึ่งกำหนดให้กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ทั้งสองนี้จะมีค่าไม่เท่ากัน โดยใช้ค่าความต้านทานเป็นตัวกำหนดค่ากระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ให้มีจำนวนเท่าที่แตกต่างกันเป็น 5 เท่า และ 10 เท่า ตามลำดับ จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ทรานซิสเตอร์(Q3,Q4)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



รูปที่ 4.1 แสดงวงจรแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ใช้ค่าความต้านทานเป็นตัวกำหนดค่ากระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์

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

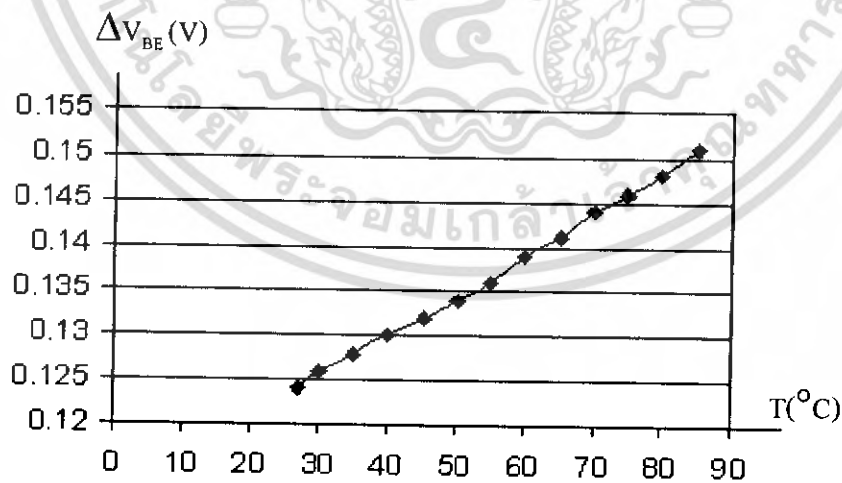
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ ที่ได้จากการ simulation ใน โปรแกรม PSPICE ที่กระแสต่างกัน 5 เท่า

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

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

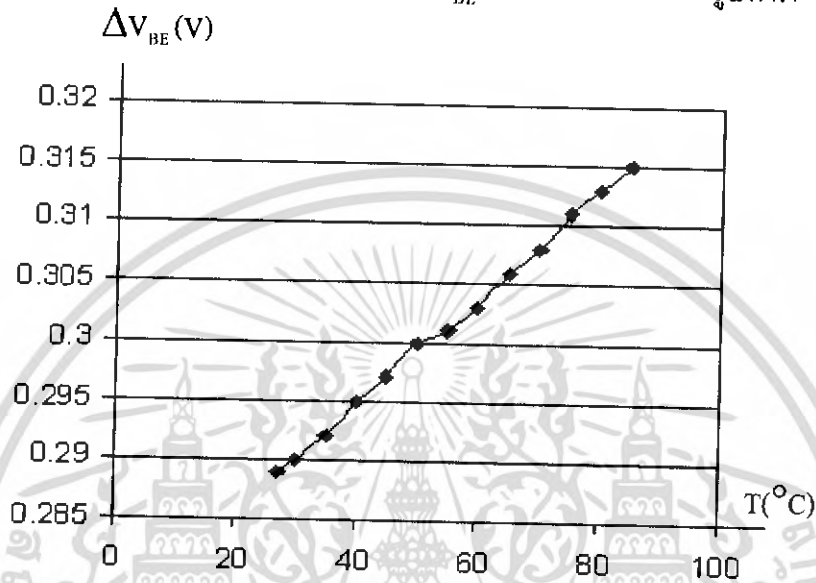


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ โดยกระแสต่างกัน 5 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

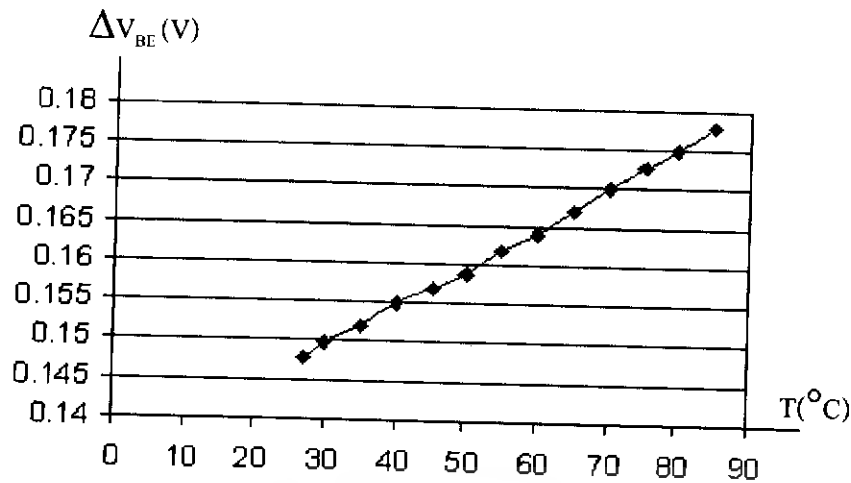
จากนั้นทำการเปลี่ยนค่าความต้านทานเป็น  $R_s=1 \text{ k}\Omega$   $R_1= 100 \Omega$   $R_2= 1000 \Omega$  หรือค่ากระแสต่างกัน 10 เท่า โดยในตอนแรก ทำการทดลองโดยการ simulation ในโปรแกรม PSPICE ซึ่งผลจากการ simulation โดยการวัดค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ที่อุณหภูมิค่าต่างๆที่ได้จากการ simulation ในโปรแกรม PSPICE ที่กระแสต่างกัน 10 เท่า

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

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

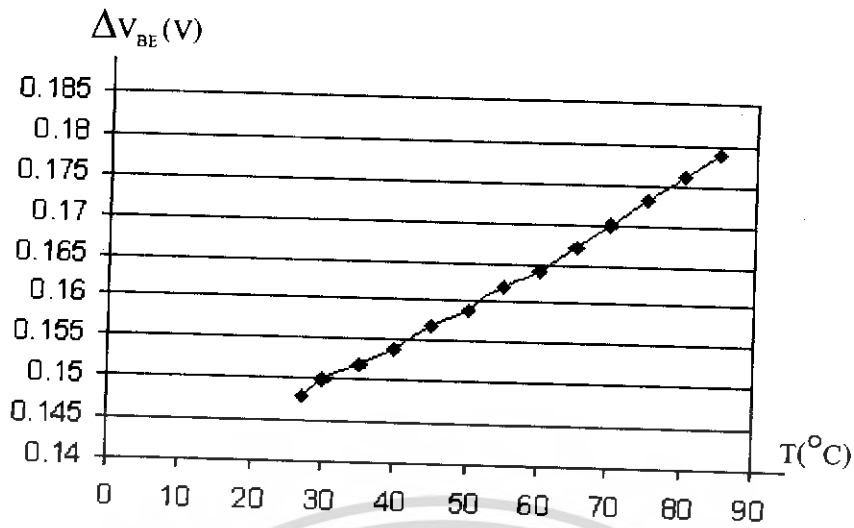


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ โดย  
กระแสต่างกัน 10 เท่า

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

จากผลการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมดจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น และเมื่อพิจารณาค่าของ  $\Delta V_{BE}$  ที่วัดได้จะพบว่าค่าของ  $\Delta V_{BE}$  ที่กระแสต่างกัน 10 เท่าจะมีค่าสูงกว่าที่กระแสต่างกัน 5 เท่าซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการ  $\Delta V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_2}{I_1}$  ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะกำหนดให้มีค่ากระแสต่างกัน 10 เท่าเพื่อที่จะทำให้ค่าที่วัดได้มีค่าสูงขึ้นซึ่งทำให้ง่ายต่อการวัดและบันทึกผลมากยิ่งขึ้น

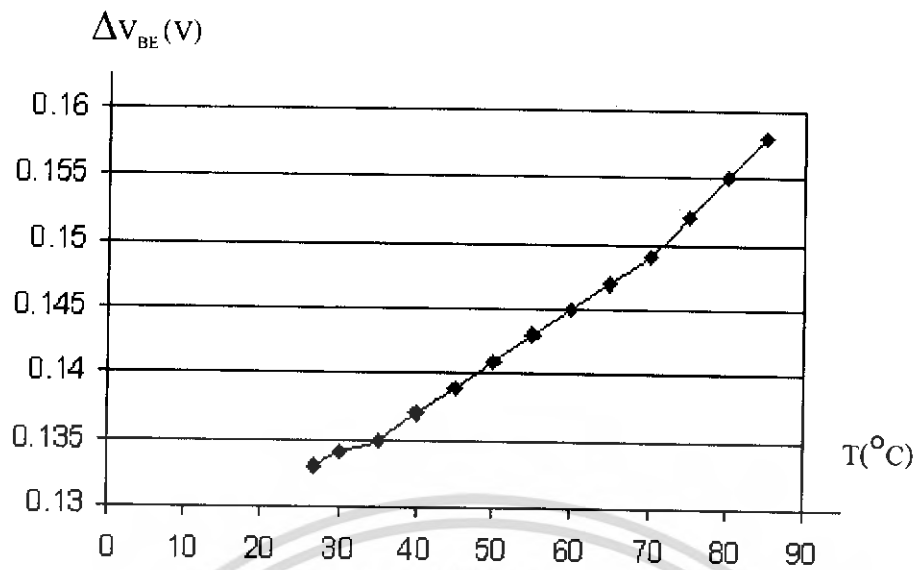
ต่อไปจะพิจารณาถึงผลของปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวทรานซิสเตอร์โดยการลดปริมาณกระแสที่ไหลผ่านลงซึ่งทำได้โดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานเป็น  $R_s = 1 \text{ M}\Omega$  และใช้ค่าความต้านทาน  $R_1 = 100 \text{ }\Omega$   $R_2 = 1000 \text{ }\Omega$  เท่าเดิม ซึ่งจากผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



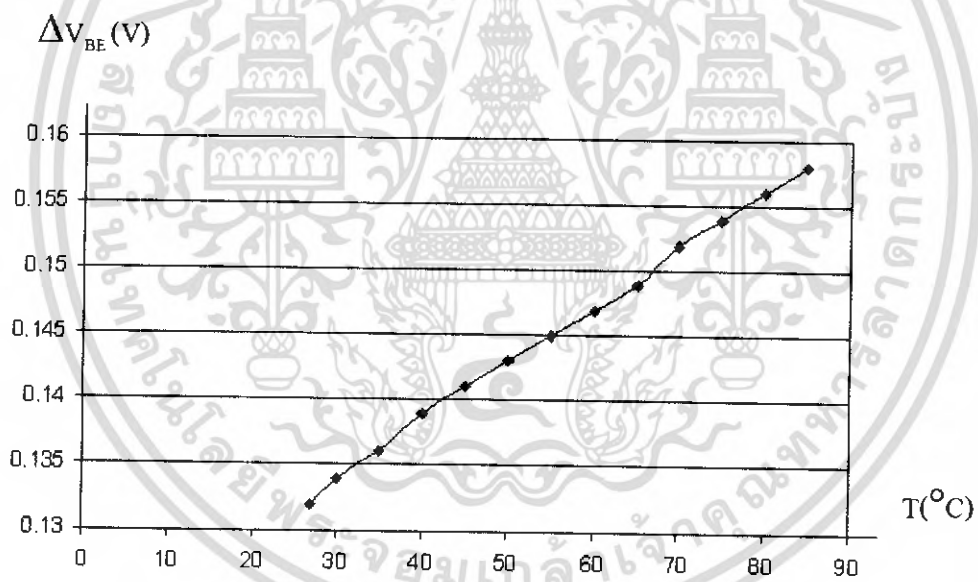
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์มีค่าลดลงจะไม่ส่งผลต่อค่าของความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ซึ่งเมื่อวัดค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ต่ออุณหภูมิจะได้เป็น  $0.5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  เท่าเดิม เนื่องจากรูปแบบของวงจรที่กำหนดให้มีปริมาณกระแสต่างกันเป็นจำนวนเท่า ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการ  $\Delta V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_2}{I_1}$  จะพบว่าค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์แต่จะขึ้นอยู่กับจำนวนเท่าของกระแสที่ต่างกัน ดังนั้นวงจรชนิดนี้จึงง่ายต่อการออกแบบซึ่งเพียงออกแบบให้ทรานซิสเตอร์สามารถทนปริมาณกระแสที่ไหลได้ก็เพียงพอ ดังนั้นวงจรนี้จึงใช้ค่าความต้านทาน  $R_s = 1 \text{ k}\Omega$

จากผลการทดลองที่ผ่านมา นั้น ทรานซิสเตอร์ Q3 และ Q4 เพียง 2 ตัวเท่านั้นที่ได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นซึ่งในกระบวนการผลิตจริงนั้น ตัวเซมิคอนดักเตอร์มักจะผลิตอยู่ในรูปของวงจรรวม ดังนั้นทุกๆ ส่วนของวงจรจึงได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นทั้งหมด การทดลองต่อไปจึงนำวงจรที่ต่อบนโฟโตบอร์ดกับบอร์ดรีเลย์บนแผ่นปริ้นท์มาเข้าเตาอบทั้งหมดแล้วเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ซึ่งจากผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ โดยนำวงจรที่ต่อบนโฟโตบอร์ดเข้าเตาอบทั้งหมด

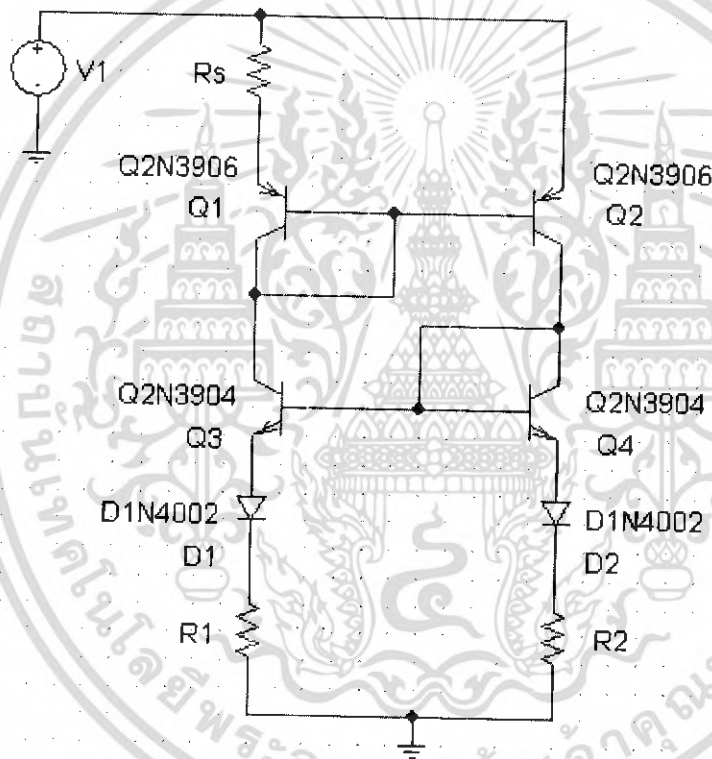


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ โดยนำวงจรที่ต่อบนแผ่นปริ๊นท์เข้าเตาอบทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

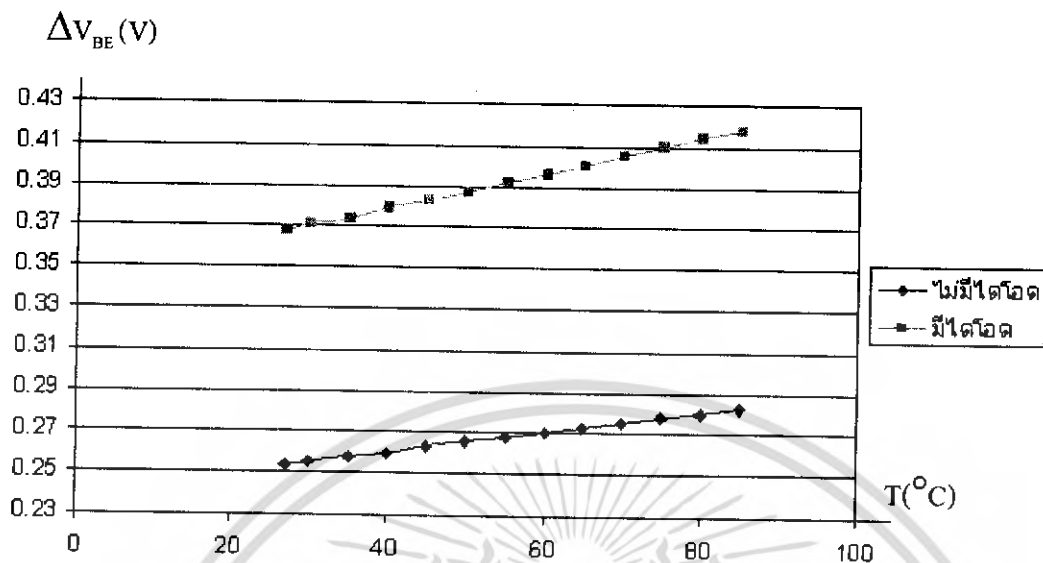
จากรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 เมื่อวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ต่ออุณหภูมิ โดยการหาค่าความชันของกราฟซึ่งจากกราฟจะได้อัตราการเปลี่ยนแปลงเป็น  $0.375 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  และ  $0.4 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าค่าความชันของกราฟของวงจรที่ต่อบนแผ่นปริ้นซ์มีค่ามากกว่า ซึ่งอาจเกิดจากผลของค่าความต้านทานและค่าความจุไฟฟ้าภายในตัวโฟโตบอร์ด จึงทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ต่ออุณหภูมิมิมีค่าน้อยลง

จากนั้นต่อวงจรตามรูปที่ 4.9 ซึ่งวงจรนี้ได้เพิ่มไดโอดเข้าไปเพื่อศึกษาผลของไดโอดที่มีต่อค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$



รูปที่ 4.9 วงจรที่ใช้ศึกษาผลของไดโอดที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$

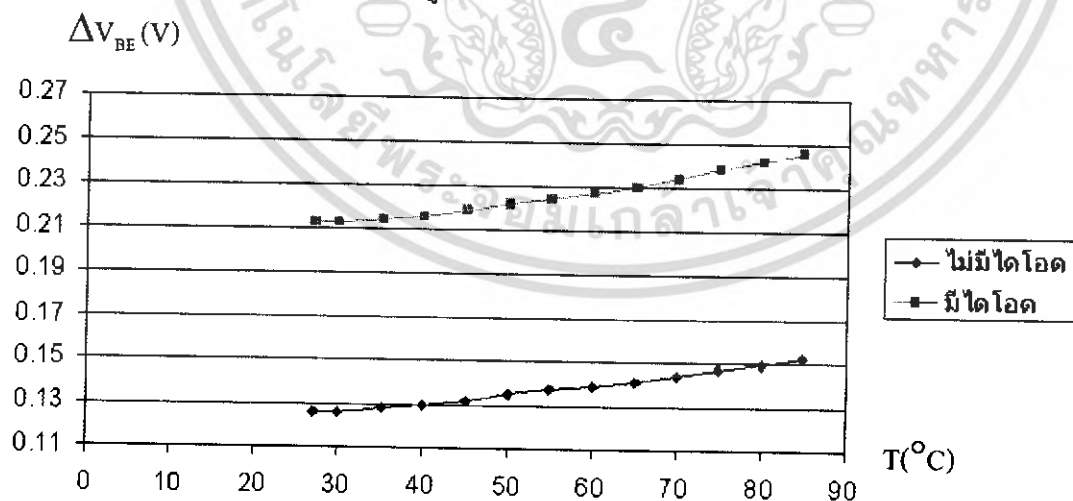
โดยในตอนแรกทำการsimulation ในโปรแกรมโปรแกรม PSPICE ซึ่งผลจากการ simulation แสดงได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ขณะที่มีและไม่มีไดโอดที่อุณหภูมิค่าต่างๆที่ได้จากการ simulation ในโปรแกรม PSPICE

เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ต่ออุณหภูมิขณะที่ไม่  
มีไดโอดเท่ากับ  $0.457 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  และขณะที่มีไดโอดเท่ากับ  $0.86 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.9  
เท่าของค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ขณะที่ไม่  
มีไดโอด

จากนั้นต้องจรรยาตามรูปที่ 4.9 ลงบนโฟโตบอร์ดแล้ววัดค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ขณะมีไดโอด  
กับไม่มีไดโอดซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11

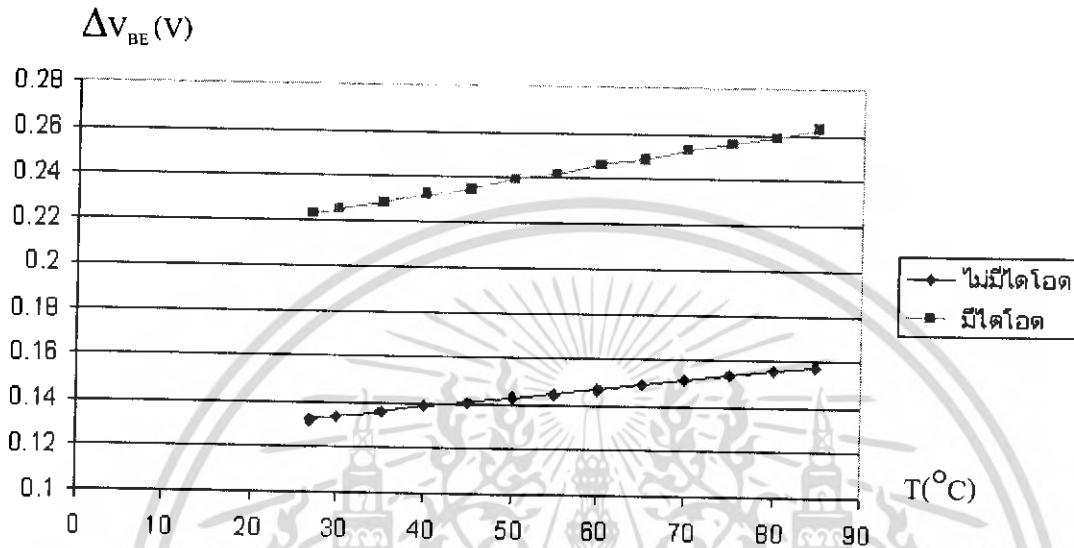


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ขณะที่มีและไม่มีไดโอดที่อุณหภูมิ  
ค่าต่างๆที่ได้จากการต่อวงจรลงบนโฟโตบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

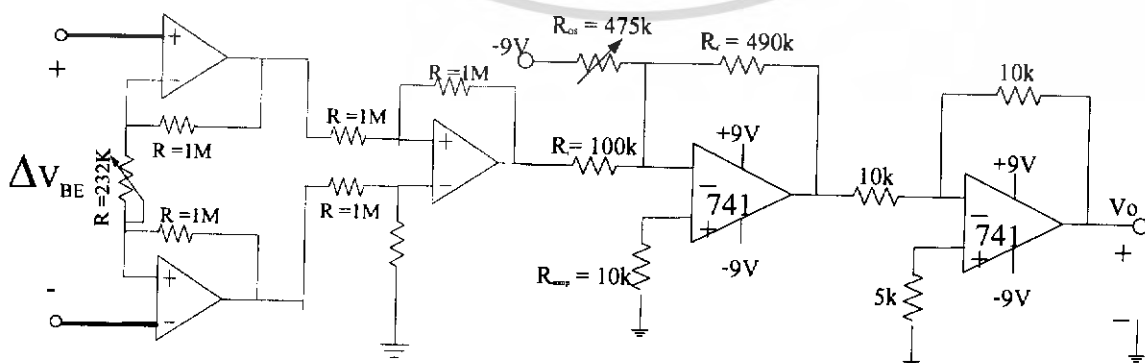
จากนั้นต่อวงจรตามรูปที่ 4.9 ลงบนแผ่นปริ้นซ์แล้ววัดค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ขณะมีไดโอด กับไม่มีไดโอดได้ผลดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ขณะที่ไม่มีและไม่มีไดโอดที่อุณหภูมิค่าต่างๆที่ได้จากการ ต่อวงจรลงบนแผ่นปริ้นซ์

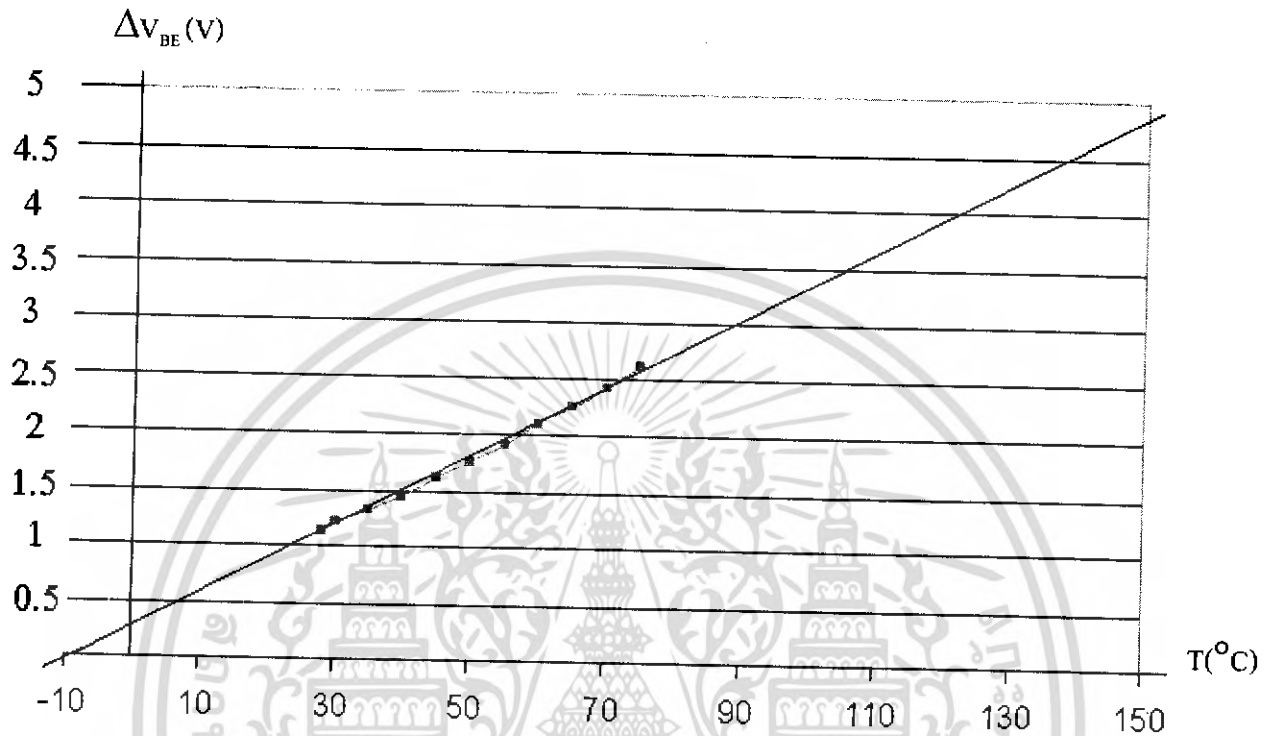
เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ต่ออุณหภูมิ ขณะที่ไม่มีไดโอดเท่ากับ  $0.4 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  และขณะที่มีไดโอดเท่ากับ  $0.714 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าของค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ขณะที่ไม่มีไดโอด

จากนั้นนำค่า  $\Delta V_{BE}$  ที่ได้จากรวงจรวัดวัดอุณหภูมิไปเข้าวงจรขยายอินสตรูเมนต์ (Instrument Amplifier) และวงจรปรับความชันและตำแหน่งศูนย์ (Zero and Span circuit) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13



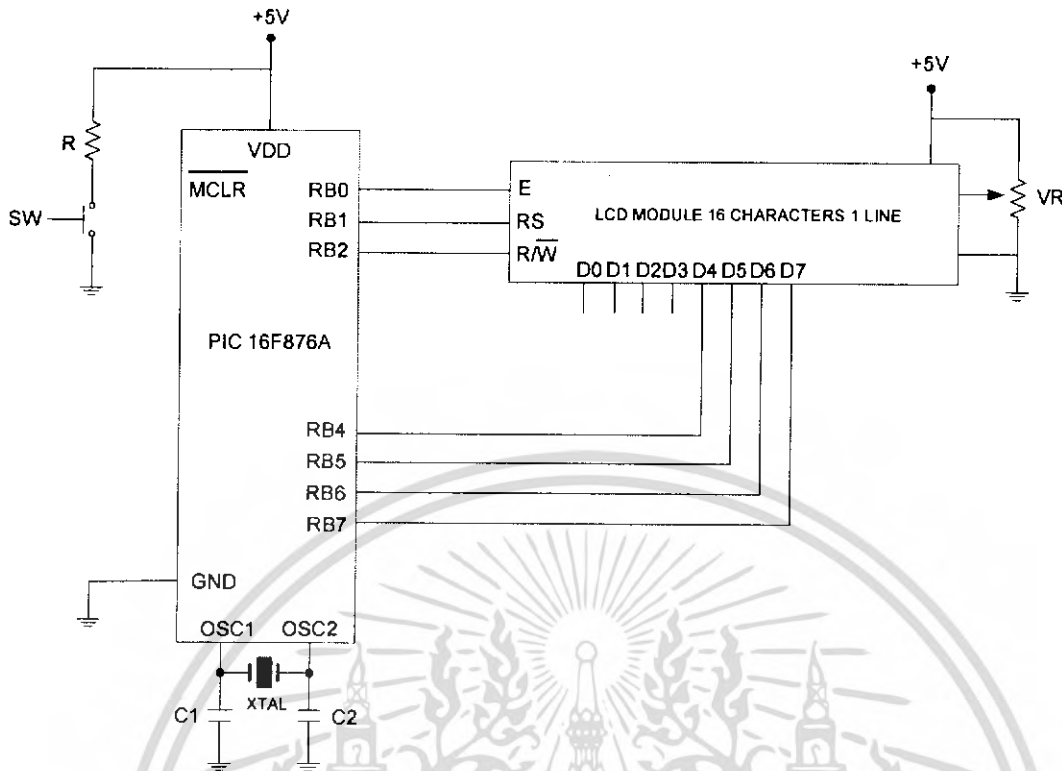
รูปที่ 4.13 แสดงวงจรที่ใช้ในการขยายสัญญาณและปรับแต่งสัญญาณไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ที่ได้หลังจากการขยายและปรับแต่งสัญญาณ แล้วนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\Delta V_{BE}$  และอุณหภูมิ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  หลังจากการขยายและปรับแต่งสัญญาณที่อุณหภูมิต่างๆ

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



รูปที่ 4.15 วงจรที่ใช้สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์

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

| อุณหภูมิที่อ่านได้ (°C) |           |           |           |        | %ความแตกต่าง<br>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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

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

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

จากนั้นทำการทดลองโดยให้ทั้งวงจรเข้าเดอบทั้งหมดเพื่อให้อุปกรณ์ทุกตัวในวงจรได้รับความร้อนเท่ากัน และใช้อัตราส่วนกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ทั้งสองเป็น 10 เท่า โดยในตอนแรกลองทำการ Simulation บนโปรแกรม PSPICE พบว่าได้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ต่ออุณหภูมิเป็น  $0.457 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  และในการทดลองจริงจะต้องวงจรบนโฟโตบอร์ดและวงจรแผ่นปริ้นซ์ พบว่าเมื่อต่อวงจรบนโฟโตบอร์ดจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ต่ออุณหภูมิเป็น  $0.375 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  และเมื่อต่อวงจรบนแผ่นปริ้นซ์จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ต่ออุณหภูมิเป็น  $0.4 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าวงจรที่ต่อบนแผ่นปริ้นซ์จะให้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ต่ออุณหภูมิที่มากกว่าบนโฟโตบอร์ด ทั้งนี้เนื่องมาจากโฟโตบอร์ดอาจมีการสะสมความร้อนในตัวหรืออาจเกิดจากผลของค่าความต้านทานและค่าความจุไฟฟ้าภายในตัวโฟโตบอร์ดจึงทำให้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ต่ออุณหภูมิของวงจรที่ต่อบนโฟโตบอร์ดมีค่าลดน้อยลง

ส่วนการทดลองตอนถัดไปนี้จะทำการเพิ่มไดโอดเข้ามาในวงจรด้วยดังรูปที่ 3.9 เพื่อศึกษาผลของไดโอดที่มีต่อค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  โดยในตอนแรกทำการ Simulate ผลการทดลองบนโปรแกรม PSPICE พบว่าได้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ต่ออุณหภูมิเป็น  $0.86 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  ซึ่งในการทดลองจริงจะต้องวงจรบนโฟโตบอร์ดและแผ่นปริ้นซ์เหมือนกับการทดลองตอนที่แล้ว จะพบว่าเมื่อต่อวงจรบนโฟโตบอร์ดจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ออุณหภูมิเป็น  $0.6 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่ เมื่อต่อวงจรบนแผ่นปริ๊นซ์จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ต่ออุณหภูมิเป็น  $0.714 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ต่ออุณหภูมิของวงจรที่ต่อบนแผ่นปริ๊นซ์ จะมีค่ามากกว่าวงจรที่ต่อบนโฟโตบอร์ด ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้วในการทดลองตอนที่แล้ว

เมื่อพิจารณาผลการทดลองทั้งหมดโดยการเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ต่ออุณหภูมิขณะที่มีและไม่มีไดโอด จะพบว่า

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

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

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

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การมีไดโอดเพิ่มเข้าไปในวงจรมันทำให้ อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์  $\Delta V_{BE}$  ต่ออุณหภูมิมียุ่ค่าสูงขึ้น ทำให้วงจรที่ได้นั้นมี การตอบสนองต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปได้ดีขึ้น

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

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

เมื่อทำการทดลองโดยใช้เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้นไปใช้วัดอุณหภูมิจริง ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 จากตารางเป็นการอ่านค่าอุณหภูมิจากเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้น โดยเปรียบเทียบที่อ่านได้กับเทอร์โมมิเตอร์ปรอท แล้วหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่เกิดขึ้น จะพบว่า อุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์ปรอทกับเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิแบบไดโอดคู่ มีค่าที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยซึ่งค่าความแตกต่างนี้ยังคงอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ เนื่องจากค่าที่อ่านได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเทอร์โมมิเตอร์ปรอทที่ใช้เปรียบเทียบอุณหภูมินั้น เป็นค่าที่ได้จากการคาดคะเนด้วยสายตาของ  
 ตัวผู้ทดลองและไม่สามารถอ่านค่าให้มีความละเอียดเป็นเลขทศนิยมได้ ดังนั้นอุณหภูมิที่อ่านได้จาก  
 เซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นจึงอาจมีค่าที่แตกต่างจากเทอร์โมมิเตอร์ปรอทได้

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้นมานั้นมีความ  
 ถูกต้องแม่นยำสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้จริง

ในการทดลองนี้มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความละเอียดของเทอร์โมมิเตอร์, ช่วงการวัด  
 อุณหภูมิซึ่งเดอบที่ใช้ในการทดลองสามารถวัดอุณหภูมิได้เพียง 25 – 85 °C เท่านั้น ซึ่งมีผลทำให้  
 การทดลองได้ข้อมูลไม่เพียงพอเท่าที่ควร อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดต่าง ๆ ที่ได้รับการทดลองเหล่านี้ จะ  
 เป็นประโยชน์ และสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ดี  
 ยิ่งขึ้นต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

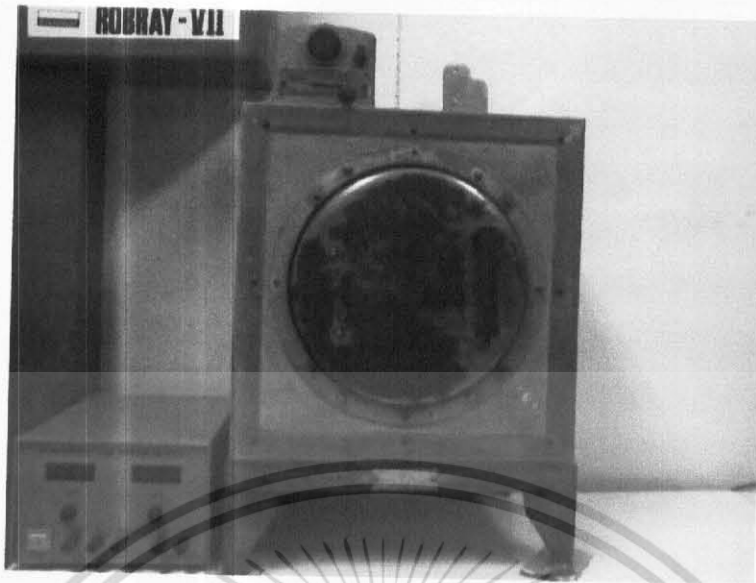
## หนังสืออ้างอิง

1. Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith, “**Microelectronic Circuits third edition**”, Oxford University Press, 1991
2. Charles K. Alexander, Matthew N.O. Sadiku, “**Fundamental of Electric Circuit**”, McGraw-Hill, 1999
3. S. Middelhoek, S. A. Audet, “**Silicon Sensors**”, Academic Press, 1989
4. Ljubisa Ristic, “**Sensor Technology and Devices**”, Artech House, 1994
5. Julian W. Gardner, Vijay K. Varadan, Osama O. Awadelkarim, “**Microsensors, MEMS and Smart Devices**” , John Wiley & Sons, Ltd, 2001
6. Lake Shore Crytronics Inc, “**Temperature Measurement and Control Catalog**”, 2003
7. รศ.ดร.สมเกียรติ ศุกเดช , “Semiconductor Physics” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
8. รศ.ดร.สมเกียรติ ศุกเดช , “Semiconductor Devices” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
9. ผศ. ดร. วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์, “เซนเซอร์และทรานส์ดิวเซอร์” , สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. ,2548
10. เอกสารประกอบการอบรมความรู้ด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น , Electronics Research Center , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

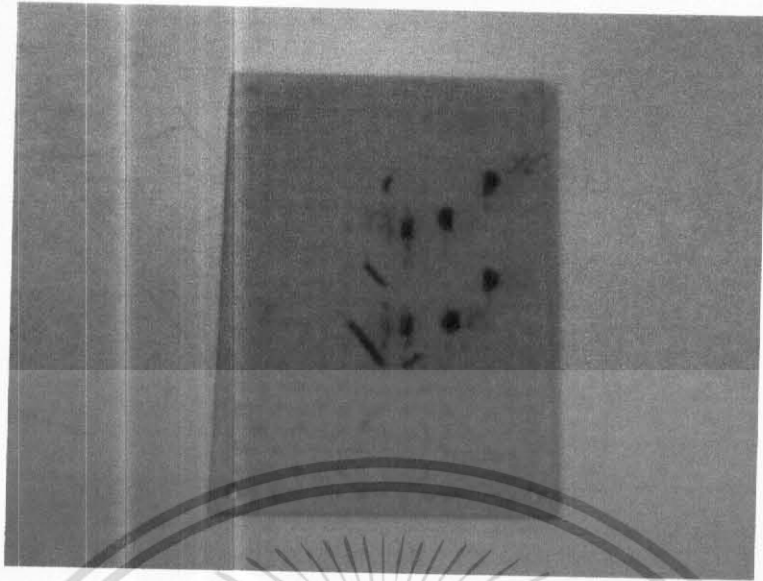


รูปที่ 1 เต้าอบและแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ในการทดลอง

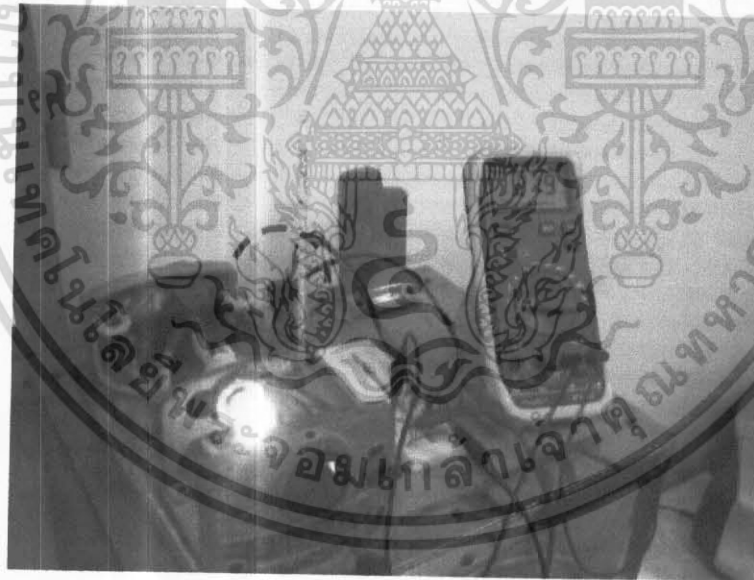


รูปที่ 2 รูปวงจรที่ต่อลงโฟโตบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

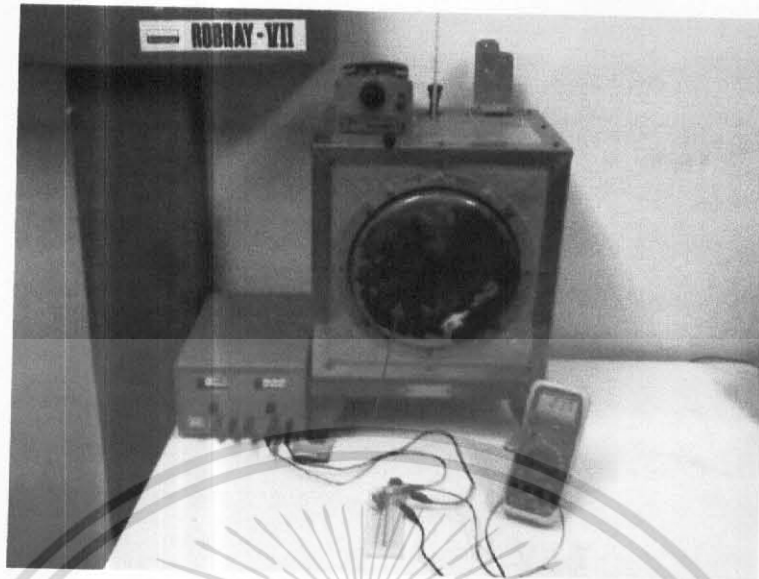


รูปที่ 3 รูปวงจรที่ต่อลงแผ่นปริ๊นซ์



รูปที่ 4 นำทรานซิสเตอร์ Q3 , Q4 เข้าเตาอบโดยใส่เข้าทางช่องที่อยู่ด้านหลัง  
แล้วทำการวัดค่าของ  $\Delta V_{BE}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

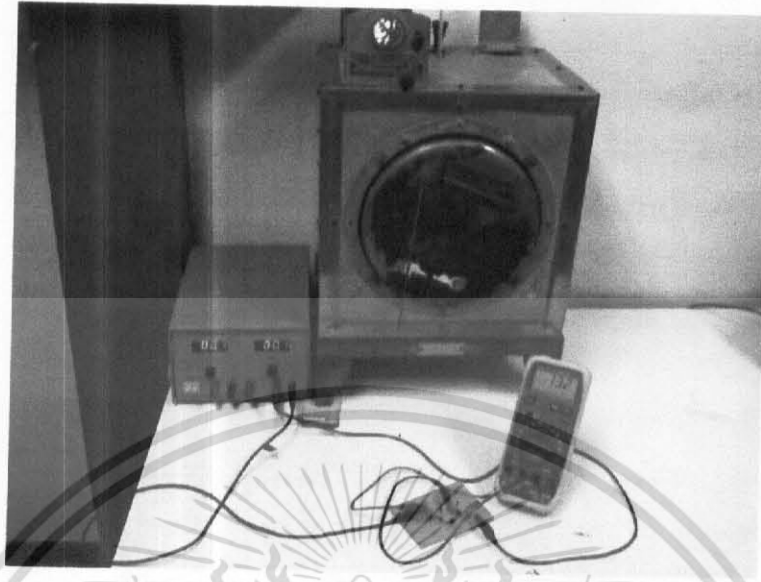


รูปที่ 5 นำวงจรที่ต่อลงบอร์ดเข้าเตาอบ



รูปที่ 6 ทำการวัดหาค่าของ  $\Delta V_{BE}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 นำวงจรที่ต่อลงแผ่นไข่ปลาเข้าเตาอบแล้วทำการวัดหาค่าของ  $\Delta V_{BE}$



รูปที่ 8 หัววัดอุณหภูมิแบบไดโอดคู่ที่สร้างขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ภาคผนวก ข**  
**เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการสร้างโคโอด**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



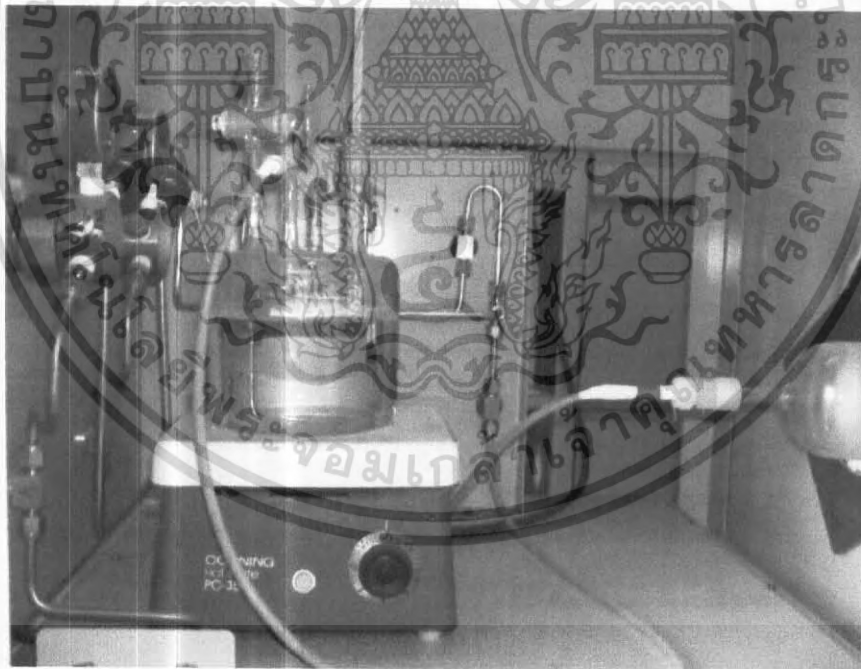
รูปที่ 9 วงจรภายในตัวชิ้นงาน

รูปที่ 10 ภาพตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบไดโอดคู่ที่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

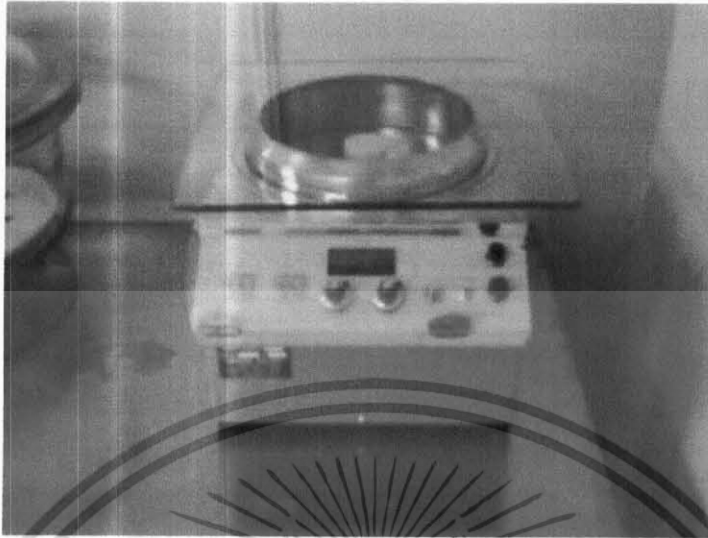


รูปที่ 1 Chamber ไว้ใช้สำหรับเตรียมสาร

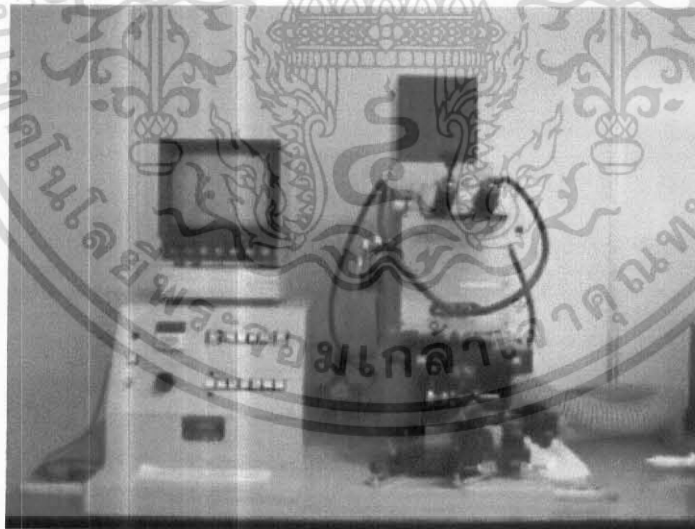


รูปที่ 2 เตาเพอร์แบบ Wet Oxidation ที่ต้องใช้ไอน้ำในการเพอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

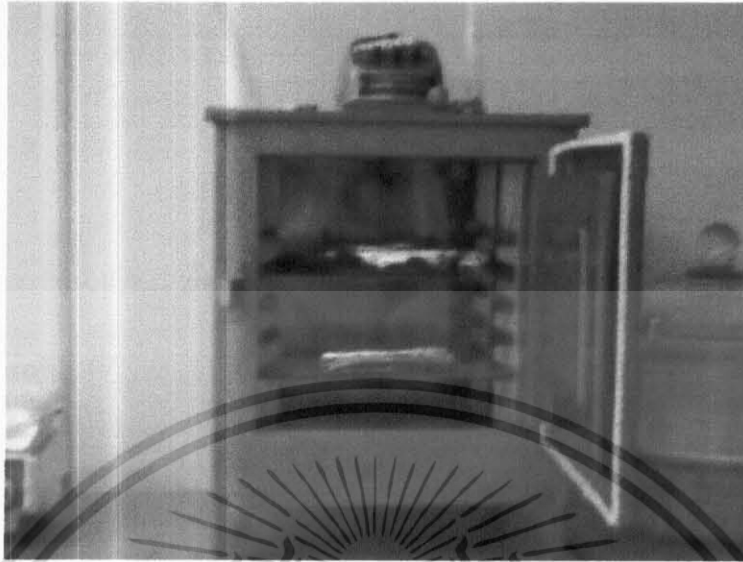


รูปที่ 3 เครื่องสปีนเนอร์

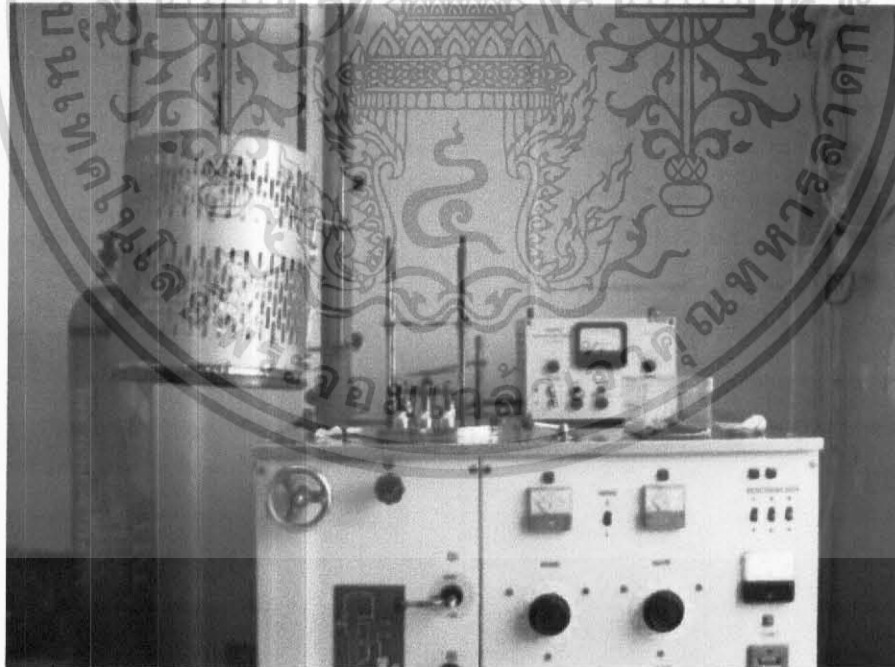


รูปที่ 4 เครื่องถ่ายแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

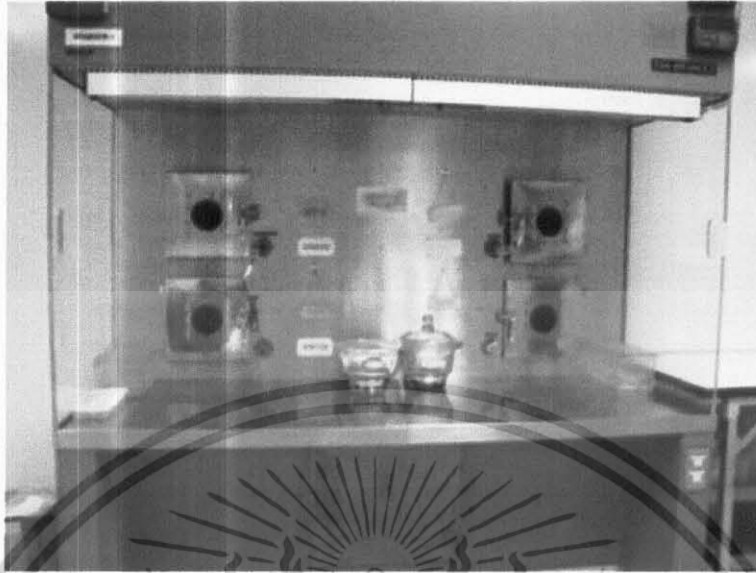


รูปที่ 5 เตาอบที่ใช้ในการอบ Prebreak และ Postbake



รูปที่ 6 เครื่อง Evaporation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 เครื่องที่ใช้ในการ Sintering

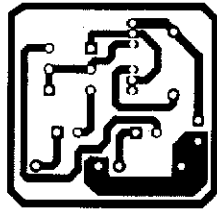
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



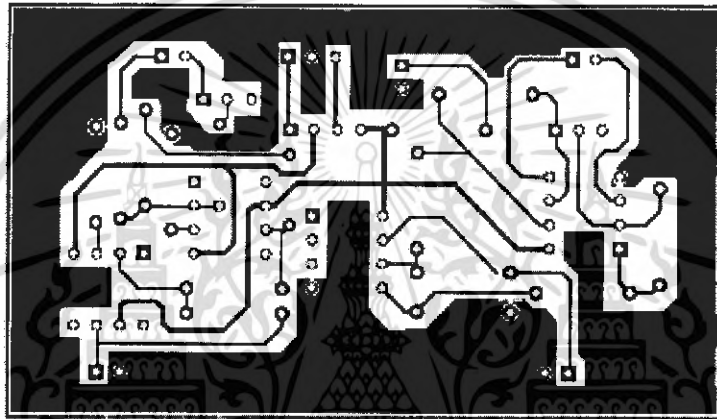
**ภาคผนวก ค**

**ลายวงจรและ การเขียนโปรแกรม**

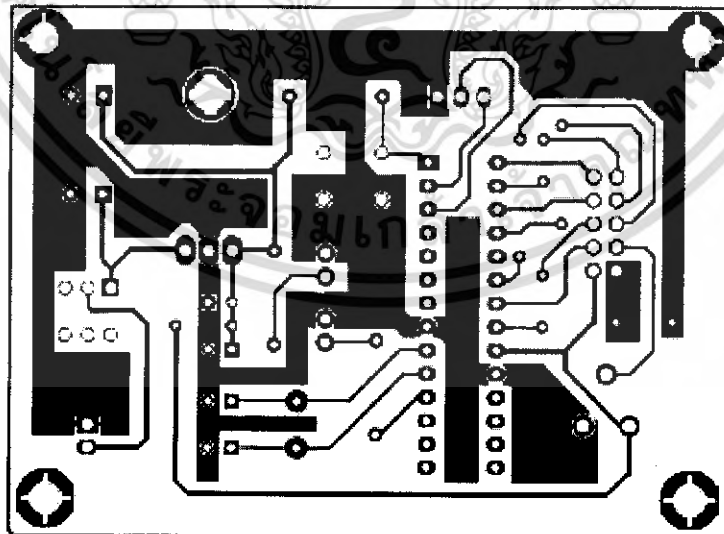
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 ลายวงจรของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ



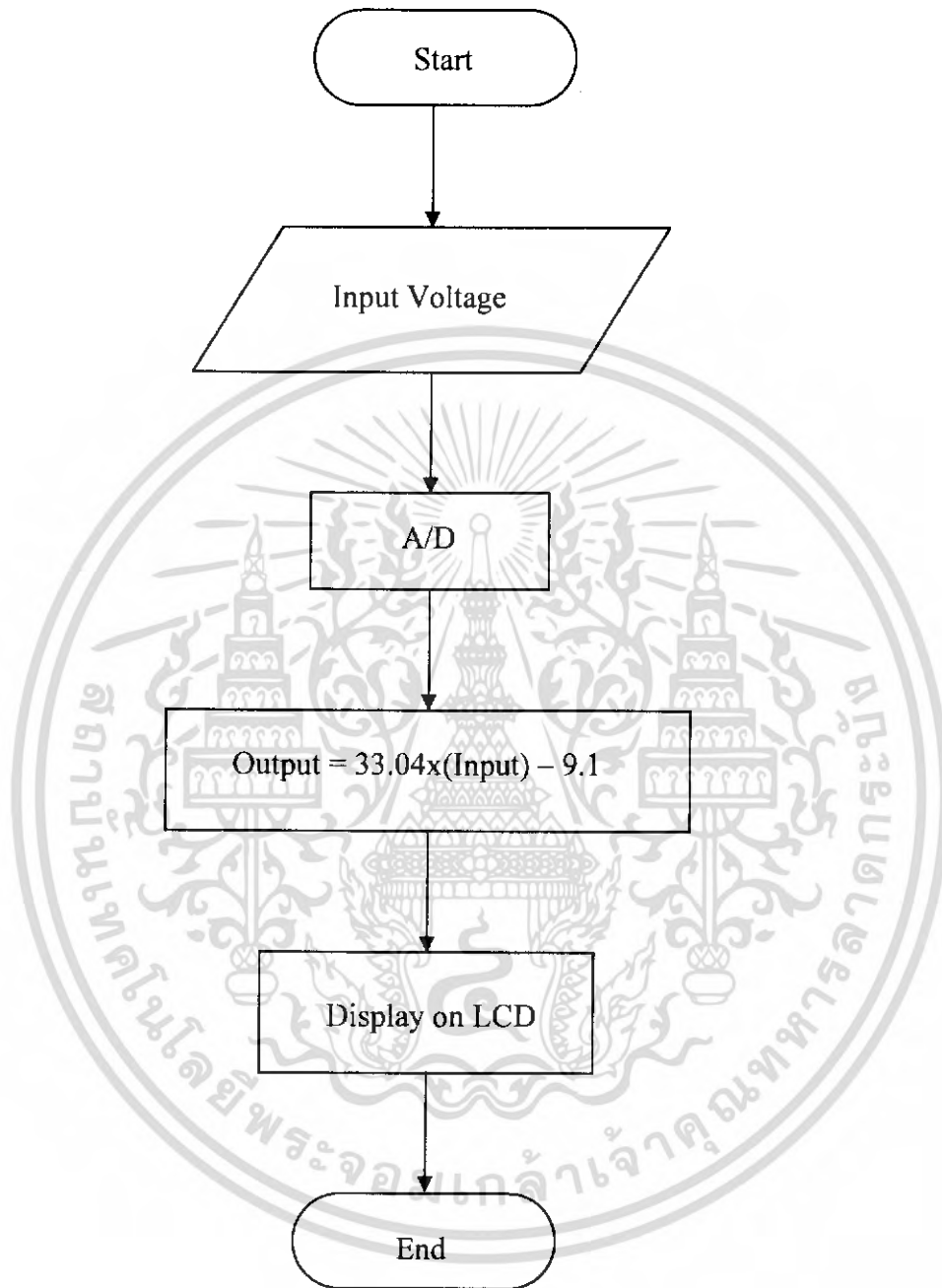
รูปที่ 2 ลายวงจรของวงจรขยายและวงจรปรับแต่งสัญญาณ



รูปที่ 3 ลายวงจรของวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์และส่วนแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมเพื่อแสดงผลบนจอ LCD



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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;

#ifdef __PCH__
#ifdef use_portb_lcd
    #byte lcd = 0xF81        // This puts the entire structure
#else
    #byte lcd = 0xF83        // This puts the entire structure
#endif
#else
#ifdef 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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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;
    delay_cycles(1);
    lcd.rw = 0;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    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;

```

```

    lcd_gotoxy(x,y);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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
#fuses HS,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP
#device ADC=16
#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  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2N3904

# SMALL SIGNAL NPN TRANSISTOR

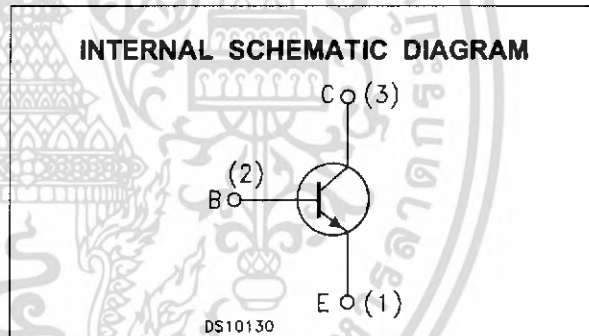
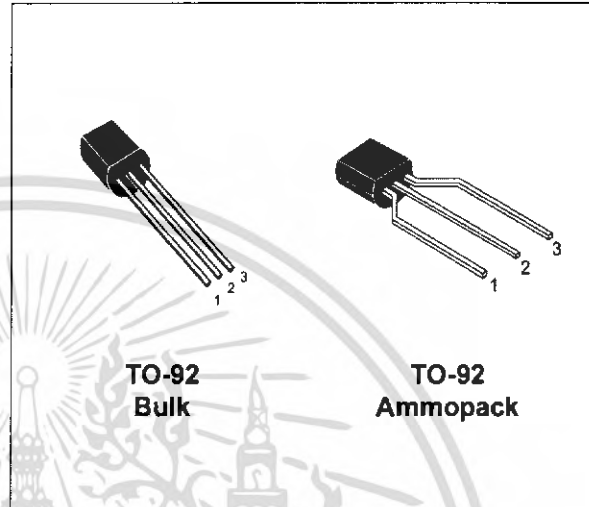
## PRELIMINARY DATA

| Ordering Code | Marking | Package / Shipment |
|---------------|---------|--------------------|
| 2N3904        | 2N3904  | TO-92 / Bulk       |
| 2N3904-AP     | 2N3904  | TO-92 / Ammopack   |

- SILICON EPITAXIAL PLANAR NPN TRANSISTOR
- TO-92 PACKAGE SUITABLE FOR THROUGH-HOLE PCB ASSEMBLY
- THE PNP COMPLEMENTARY TYPE IS 2N3906

### APPLICATIONS

- WELL SUITABLE FOR TV AND HOME APPLIANCE EQUIPMENT
- SMALL LOAD SWITCH TRANSISTOR WITH HIGH GAIN AND LOW SATURATION VOLTAGE



### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

| Symbol    | Parameter   | Value      | Unit             |
|-----------|---|------------|------------------|
| $V_{CBO}$ | Collector-Base Voltage ( $I_E = 0$ )                  | 60         | V                |
| $V_{CEO}$ | Collector-Emitter Voltage ( $I_B = 0$ )               | 40         | V                |
| $V_{EBO}$ | Emitter-Base Voltage ( $I_C = 0$ )                    | 6          | V                |
| $I_C$     | Collector Current                                     | 200        | mA               |
| $P_{tot}$ | Total Dissipation at $T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$ | 625        | mW               |
| $T_{stg}$ | Storage Temperature                                   | -65 to 150 | $^\circ\text{C}$ |
| $T_j$     | Max. Operating Junction Temperature                   | 150        | $^\circ\text{C}$ |

## THERMAL DATA

|                  |                                     |     |      |                             |
|------------------|-------------------------------------|-----|------|-----------------------------|
| $R_{thj-amb}$ •  | Thermal Resistance Junction-Ambient | Max | 200  | $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ |
| $R_{thj-case}$ • | Thermal Resistance Junction-Case    | Max | 83.3 | $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ |

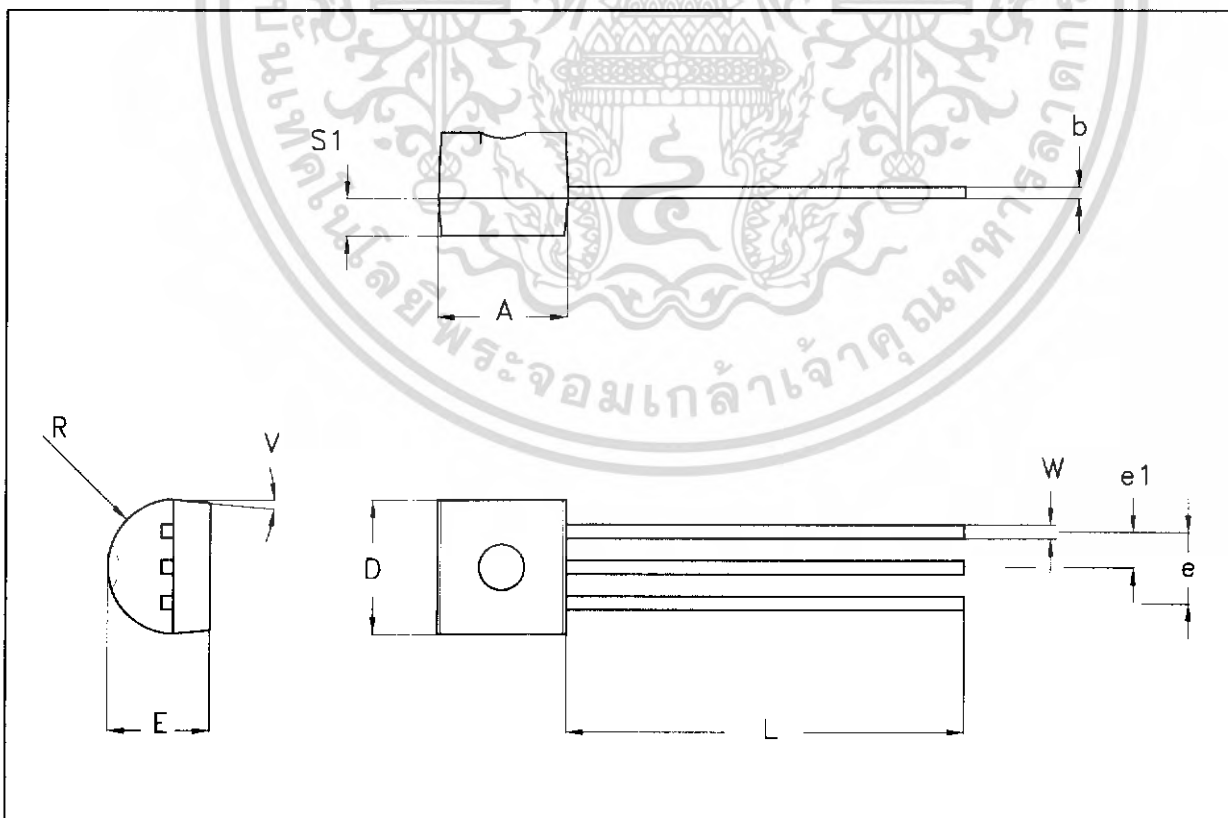
ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$  unless otherwise specified)

| Symbol          | Parameter  | Test Conditions   | Min.                        | Typ. | Max.         | Unit   |
|-----------------|--|---|-----------------------------|------|--------------|--------|
| $I_{CEX}$       | Collector Cut-off Current ( $V_{BE} = -3\text{ V}$ ) | $V_{CE} = 30\text{ V}$  |                             |      | 50           | nA     |
| $I_{BEX}$       | Base Cut-off Current ( $V_{BE} = -3\text{ V}$ )      | $V_{CE} = 30\text{ V}$  |                             |      | 50           | nA     |
| $V_{(BR)CEO}$ * | Collector-Emitter Breakdown Voltage ( $I_B = 0$ )    | $I_C = 1\text{ mA}$   | 40                          |      |              | V      |
| $V_{(BR)CBO}$   | Collector-Base Breakdown Voltage ( $I_E = 0$ )       | $I_C = 10\text{ }\mu\text{A}$   | 60                          |      |              | V      |
| $V_{(BR)EBO}$   | Emitter-Base Breakdown Voltage ( $I_C = 0$ )         | $I_E = 10\text{ }\mu\text{A}$   | 6                           |      |              | V      |
| $V_{CE(sat)}$ * | Collector-Emitter Saturation Voltage                 | $I_C = 10\text{ mA}$ $I_B = 1\text{ mA}$<br>$I_C = 50\text{ mA}$ $I_B = 5\text{ mA}$  |                             |      | 0.2<br>0.2   | V<br>V |
| $V_{BE(sat)}$ * | Base-Emitter Saturation Voltage                      | $I_C = 10\text{ mA}$ $I_B = 1\text{ mA}$<br>$I_C = 50\text{ mA}$ $I_B = 5\text{ mA}$  | 0.65                        |      | 0.85<br>0.95 | V<br>V |
| $h_{FE}$ *      | DC Current Gain                                      | $I_C = 0.1\text{ mA}$ $V_{CE} = 1\text{ V}$<br>$I_C = 1\text{ mA}$ $V_{CE} = 1\text{ V}$<br>$I_C = 10\text{ mA}$ $V_{CE} = 1\text{ V}$<br>$I_C = 50\text{ mA}$ $V_{CE} = 1\text{ V}$<br>$I_C = 100\text{ mA}$ $V_{CE} = 1\text{ V}$ | 60<br>80<br>100<br>60<br>30 |      | 300          |        |
| $f_T$           | Transition Frequency                                 | $I_C = 10\text{ mA}$ $V_{CE} = 20\text{ V}$ $f = 100\text{ MHz}$  | 250                         | 270  |              | MHz    |
| $C_{CBO}$       | Collector-Base Capacitance                           | $I_E = 0$ $V_{CB} = 10\text{ V}$ $f = 1\text{ MHz}$   |                             | 4    |              | pF     |
| $C_{EBO}$       | Emitter-Base Capacitance                             | $I_C = 0$ $V_{EB} = 0.5\text{ V}$ $f = 1\text{ MHz}$  |                             | 18   |              | pF     |
| NF              | Noise Figure   | $V_{CE} = 5\text{ V}$ $I_C = 0.1\text{ mA}$ $f = 10\text{ Hz}$<br>to 15.7 KHz $R_G = 1\text{ K}\Omega$  |                             | 5    |              | dB     |
| $t_d$           | Delay Time   | $I_C = 10\text{ mA}$ $I_B = 1\text{ mA}$  |                             |      | 35           | ns     |
| $t_r$           | Rise Time  | $V_{CC} = 30\text{ V}$  |                             |      | 35           | ns     |
| $t_s$           | Storage Time   | $I_C = 10\text{ mA}$ $I_{B1} = -I_{B2} = 1\text{ mA}$   |                             |      | 200          | ns     |
| $t_f$           | Fall Time  | $V_{CC} = 30\text{ V}$  |                             |      | 50           | ns     |

\* Pulsed: Pulse duration = 300  $\mu\text{s}$ , duty cycle  $\leq 2\%$

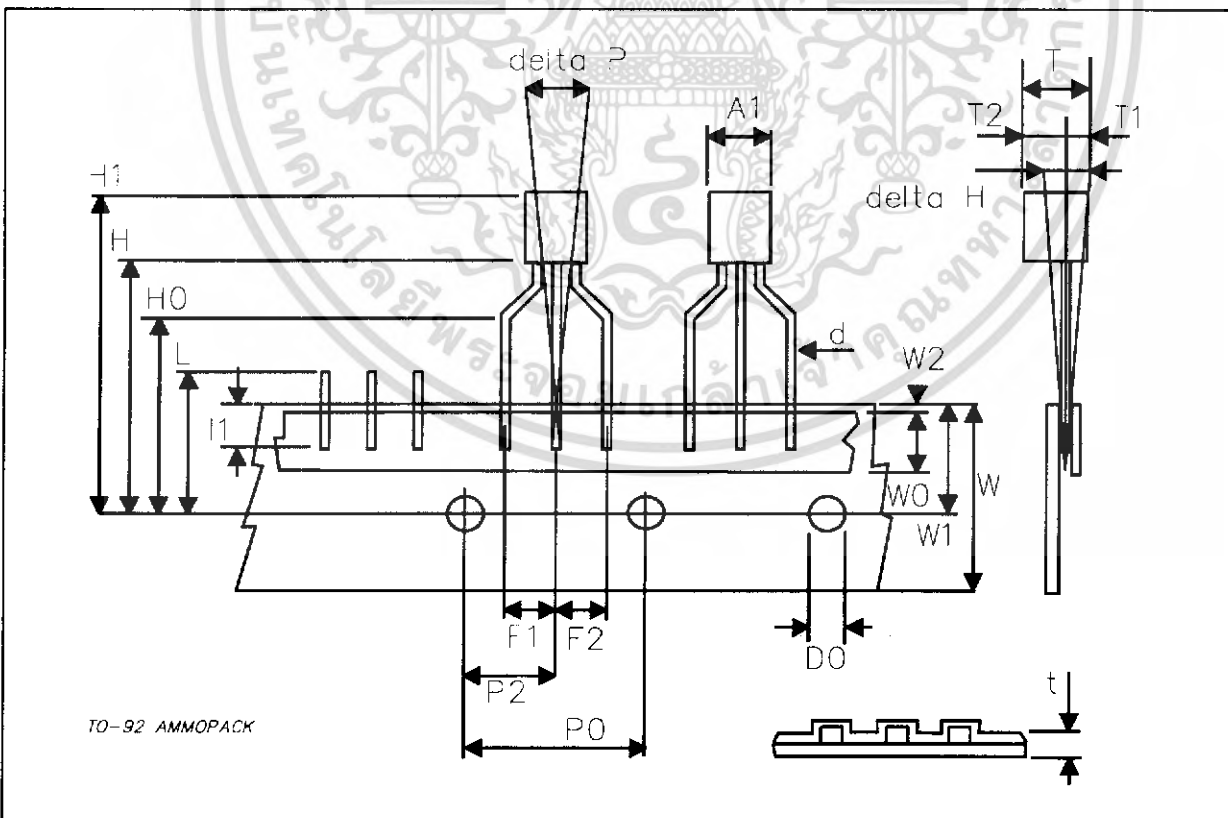
## TO-92 MECHANICAL DATA

| DIM. | mm       |      |          | inch     |      |          |
|------|----------|------|----------|----------|------|----------|
|      | MIN.     | TYP. | MAX.     | MIN.     | TYP. | MAX.     |
| A    | 4.32     |      | 4.95     | 0.170    |      | 0.195    |
| b    | 0.36     |      | 0.51     | 0.014    |      | 0.020    |
| D    | 4.45     |      | 4.95     | 0.175    |      | 0.194    |
| E    | 3.30     |      | 3.94     | 0.130    |      | 0.155    |
| e    | 2.41     |      | 2.67     | 0.095    |      | 0.105    |
| e1   | 1.14     |      | 1.40     | 0.045    |      | 0.055    |
| L    | 12.70    |      | 15.49    | 0.500    |      | 0.609    |
| R    | 2.16     |      | 2.41     | 0.085    |      | 0.094    |
| S1   | 1.14     |      | 1.52     | 0.045    |      | 0.059    |
| W    | 0.41     |      | 0.56     | 0.016    |      | 0.022    |
| V    | 4 degree |      | 6 degree | 4 degree |      | 6 degree |



**TO-92 AMMOPACK SHIPMENT (Suffix"-AP") MECHANICAL DATA**

| DIM.    | mm    |       |       | inch   |       |       |
|---------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
|         | MIN.  | TYP.  | MAX.  | MIN.   | TYP.  | MAX.  |
| A1      |       |       | 4.80  |        |       | 0.189 |
| T       |       |       | 3.80  |        |       | 0.150 |
| T1      |       |       | 1.60  |        |       | 0.063 |
| T2      |       |       | 2.30  |        |       | 0.091 |
| d       |       |       | 0.48  |        |       | 0.019 |
| P0      | 12.50 | 12.70 | 12.90 | 0.492  | 0.500 | 0.508 |
| P2      | 5.65  | 6.35  | 7.05  | 0.222  | 0.250 | 0.278 |
| F1,F2   | 2.44  | 2.54  | 2.94  | 0.096  | 0.100 | 0.116 |
| delta H | -2.00 |       | 2.00  | -0.079 |       | 0.079 |
| W       | 17.50 | 18.00 | 19.00 | 0.689  | 0.709 | 0.748 |
| W0      | 5.70  | 6.00  | 6.30  | 0.224  | 0.236 | 0.248 |
| W1      | 8.50  | 9.00  | 9.25  | 0.335  | 0.354 | 0.364 |
| W2      |       |       | 0.50  |        |       | 0.020 |
| H       | 18.50 |       | 20.50 | 0.728  |       | 0.807 |
| H0      | 15.50 | 16.00 | 16.50 | 0.610  | 0.630 | 0.650 |
| H1      |       |       | 25.00 |        |       | 0.984 |
| D0      | 3.80  | 4.00  | 4.20  | 0.150  | 0.157 | 0.165 |
| t       |       |       | 0.90  |        |       | 0.035 |
| L       |       |       | 11.00 |        |       | 0.433 |
| l1      | 3.00  |       |       | 0.118  |       |       |
| delta P | -1.00 |       | 1.00  | -0.039 |       | 0.039 |





Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specification mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

The ST logo is a trademark of STMicroelectronics

© 2003 STMicroelectronics – Printed in Italy – All Rights Reserved

STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES

Australia - Brazil - Canada - China - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Israel - Italy - Japan - Malaysia - Malta - Morocco - Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom - United States.

<http://www.st.com>





2N3906

# SMALL SIGNAL PNP TRANSISTOR

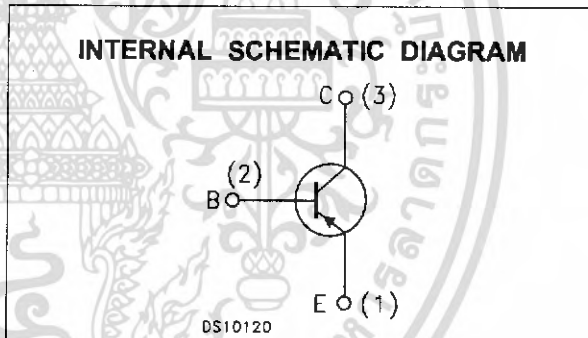
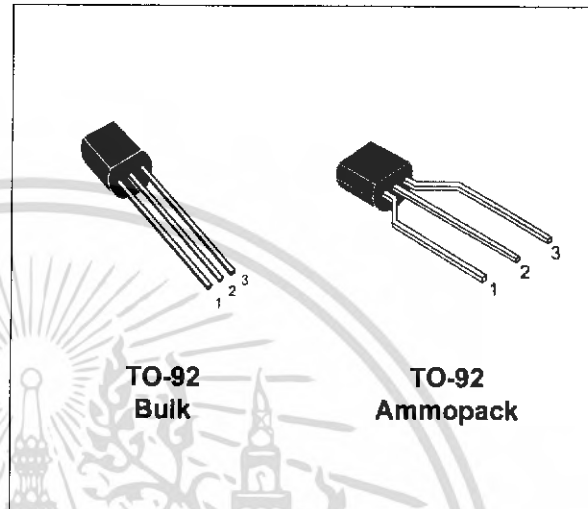
PRELIMINARY DATA

| Ordering Code | Marking | Package / Shipment |
|---------------|---------|--------------------|
| 2N3906        | 2N3906  | TO-92 / Bulk       |
| 2N3906-AP     | 2N3906  | TO-92 / Ammopack   |

- SILICON EPITAXIAL PLANAR NPN TRANSISTOR
- TO-92 PACKAGE SUITABLE FOR THROUGH-HOLE PCB ASSEMBLY
- THE NPN COMPLEMENTARY TYPE IS 2N3904

### APPLICATIONS

- WELL SUITABLE FOR TV AND HOME APPLIANCE EQUIPMENT
- SMALL LOAD SWITCH TRANSISTOR WITH HIGH GAIN AND LOW SATURATION VOLTAGE



### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

| Symbol    | Parameter   | Value      | Unit             |
|-----------|---|------------|------------------|
| $V_{CBO}$ | Collector-Base Voltage ( $I_E = 0$ )                  | -60        | V                |
| $V_{CEO}$ | Collector-Emitter Voltage ( $I_B = 0$ )               | -40        | V                |
| $V_{EBO}$ | Emitter-Base Voltage ( $I_C = 0$ )                    | -6         | V                |
| $I_C$     | Collector Current                                     | -200       | mA               |
| $P_{tot}$ | Total Dissipation at $T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$ | 625        | mW               |
| $T_{stg}$ | Storage Temperature                                   | -65 to 150 | $^\circ\text{C}$ |
| $T_j$     | Max. Operating Junction Temperature                   | 150        | $^\circ\text{C}$ |

## THERMAL DATA

|                |                                     |     |      |                             |
|----------------|-------------------------------------|-----|------|-----------------------------|
| $R_{thj-amb}$  | Thermal Resistance Junction-Ambient | Max | 200  | $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ |
| $R_{thj-case}$ | Thermal Resistance Junction-Case    | Max | 83.3 | $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ |

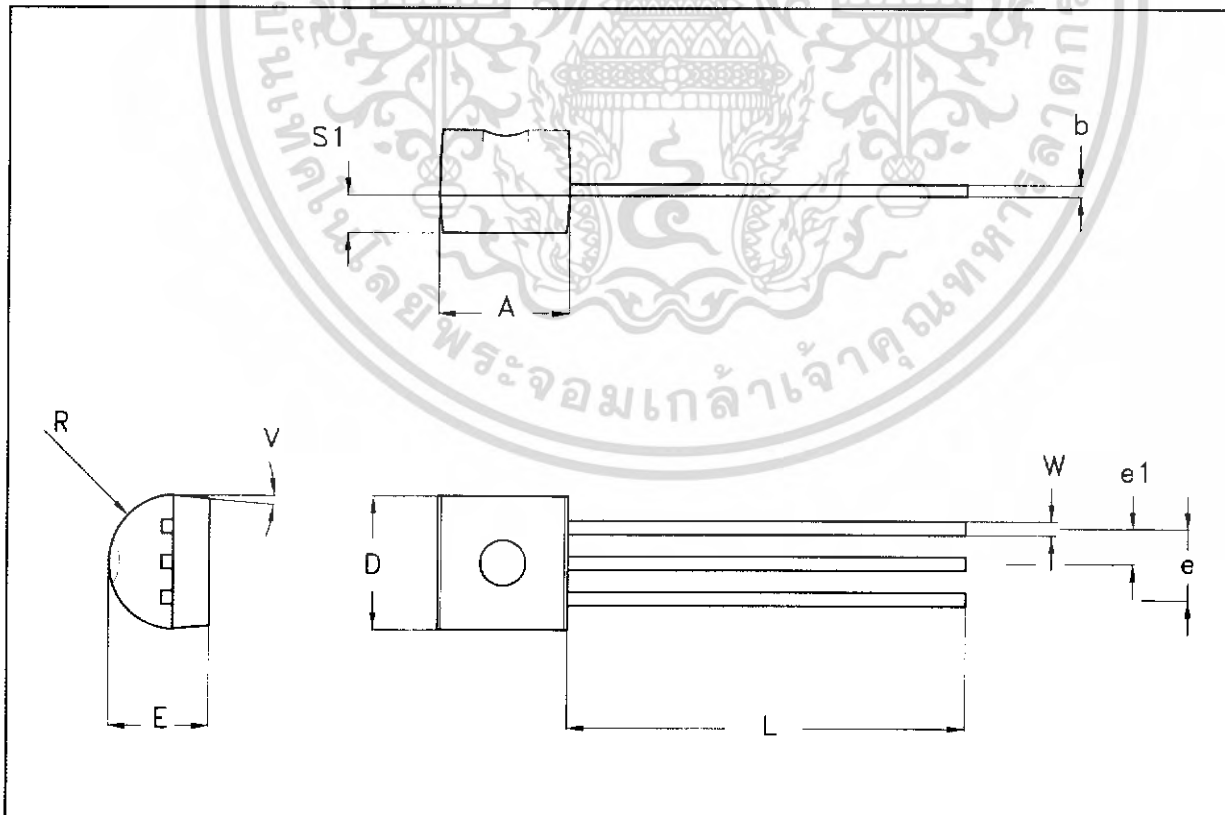
ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$  unless otherwise specified)

| Symbol          | Parameter   | Test Conditions   | Min.                        | Typ. | Max.           | Unit   |
|-----------------|---|---|-----------------------------|------|----------------|--------|
| $I_{CEX}$       | Collector Cut-off Current ( $V_{BE} = 3\text{ V}$ ) | $V_{CE} = -30\text{ V}$   |                             |      | -50            | nA     |
| $I_{BEX}$       | Base Cut-off Current ( $V_{BE} = 3\text{ V}$ )      | $V_{CE} = -30\text{ V}$   |                             |      | -50            | nA     |
| $V_{(BR)CEO}^*$ | Collector-Emitter Breakdown Voltage ( $I_B = 0$ )   | $I_C = -1\text{ mA}$  | -40                         |      |                | V      |
| $V_{(BR)CBO}$   | Collector-Base Breakdown Voltage ( $I_E = 0$ )      | $I_C = -10\text{ }\mu\text{A}$  | -60                         |      |                | V      |
| $V_{(BR)EBO}$   | Emitter-Base Breakdown Voltage ( $I_C = 0$ )        | $I_E = -10\text{ }\mu\text{A}$  | -6                          |      |                | V      |
| $V_{CE(sat)}^*$ | Collector-Emitter Saturation Voltage                | $I_C = -10\text{ mA}$ $I_B = -1\text{ mA}$<br>$I_C = -50\text{ mA}$ $I_B = -5\text{ mA}$  |                             |      | -0.25<br>-0.4  | V<br>V |
| $V_{BE(sat)}^*$ | Base-Emitter Saturation Voltage                     | $I_C = -10\text{ mA}$ $I_B = -1\text{ mA}$<br>$I_C = -50\text{ mA}$ $I_B = -5\text{ mA}$  | -0.65                       |      | -0.85<br>-0.95 | V<br>V |
| $h_{FE}^*$      | DC Current Gain                                     | $I_C = -0.1\text{ mA}$ $V_{CE} = -1\text{ V}$<br>$I_C = -1\text{ mA}$ $V_{CE} = -1\text{ V}$<br>$I_C = -10\text{ mA}$ $V_{CE} = -1\text{ V}$<br>$I_C = -50\text{ mA}$ $V_{CE} = -1\text{ V}$<br>$I_C = -100\text{ mA}$ $V_{CE} = -1\text{ V}$ | 60<br>80<br>100<br>60<br>30 |      | 300            |        |
| $f_T$           | Transition Frequency                                | $I_C = -10\text{ mA}$ $V_{CE} = -20\text{ V}$ $f = 100\text{ MHz}$  | 250                         |      |                | MHz    |
| NF              | Noise Figure  | $V_{CE} = -5\text{ V}$ $I_C = -0.1\text{ mA}$ $f = 10\text{ Hz}$<br>to $15.7\text{ KHz}$ $R_G = 1\text{ K}\Omega$   |                             | 4    |                | dB     |
| $C_{CBO}$       | Collector-Base Capacitance                          | $I_E = 0$ $V_{CB} = -5\text{ V}$ $f = 100\text{ KHz}$   |                             | 6    |                | pF     |
| $C_{EBO}$       | Emitter-Base Capacitance                            | $I_C = 0$ $V_{EB} = -0.5\text{ V}$ $f = 100\text{ KHz}$   |                             | 25   |                | pF     |
| $t_d$           | Delay Time  | $I_C = -10\text{ mA}$ $I_B = -1\text{ mA}$<br>$V_{CC} = -3\text{ V}$  |                             |      | 35             | ns     |
| $t_r$           | Rise Time   | $V_{CC} = -3\text{ V}$  |                             |      | 35             | ns     |
| $t_s$           | Storage Time  | $I_C = -10\text{ mA}$ $I_{B1} = -I_{B2} = -1\text{ mA}$<br>$V_{CC} = -3\text{ V}$   |                             |      | 225            | ns     |
| $t_f$           | Fall Time   | $V_{CC} = -3\text{ V}$  |                             |      | 72             | ns     |

\* Pulsed: Pulse duration = 300  $\mu\text{s}$ , duty cycle  $\leq 2\%$

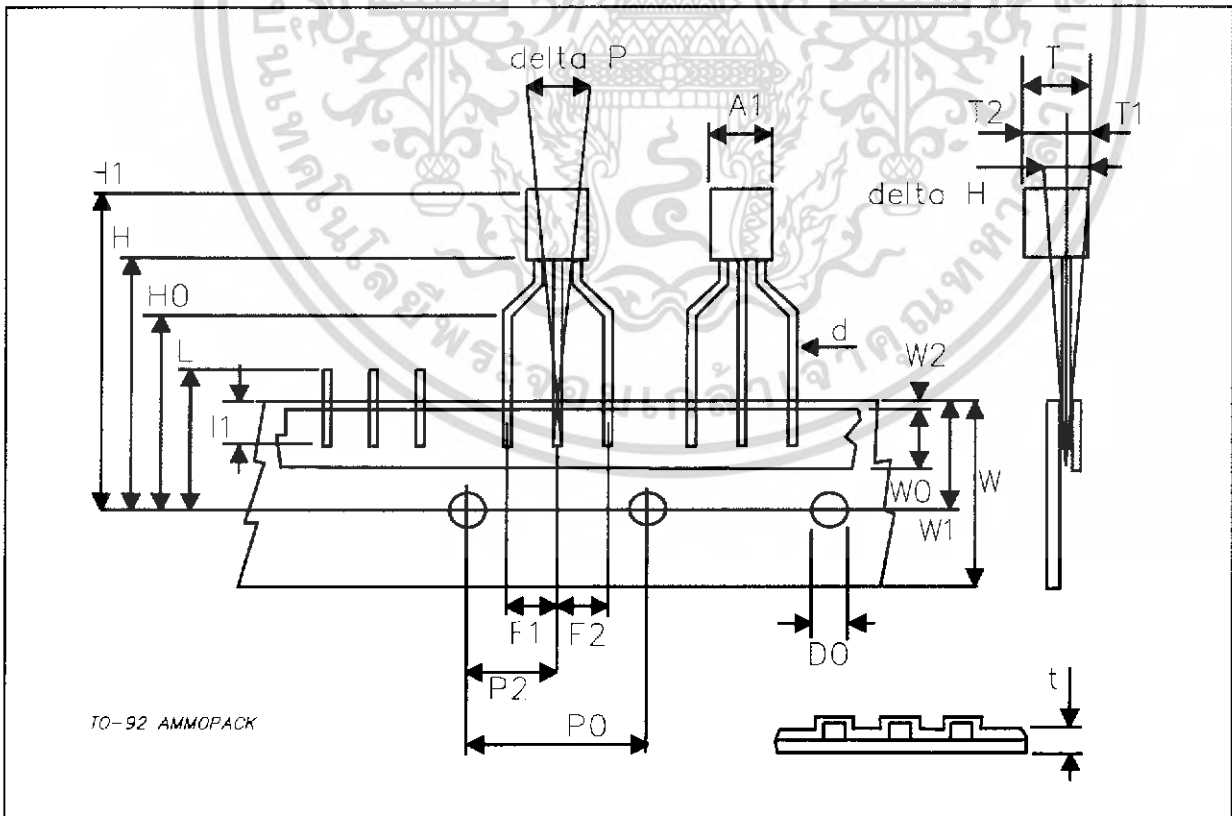
## TO-92 MECHANICAL DATA

| DIM. | mm       |      |          | inch     |      |          |
|------|----------|------|----------|----------|------|----------|
|      | MIN.     | TYP. | MAX.     | MIN.     | TYP. | MAX.     |
| A    | 4.32     |      | 4.95     | 0.170    |      | 0.195    |
| b    | 0.36     |      | 0.51     | 0.014    |      | 0.020    |
| D    | 4.45     |      | 4.95     | 0.175    |      | 0.194    |
| E    | 3.30     |      | 3.94     | 0.130    |      | 0.155    |
| e    | 2.41     |      | 2.67     | 0.095    |      | 0.105    |
| e1   | 1.14     |      | 1.40     | 0.045    |      | 0.055    |
| L    | 12.70    |      | 15.49    | 0.500    |      | 0.609    |
| R    | 2.16     |      | 2.41     | 0.085    |      | 0.094    |
| S1   | 1.14     |      | 1.52     | 0.045    |      | 0.059    |
| W    | 0.41     |      | 0.56     | 0.016    |      | 0.022    |
| V    | 4 degree |      | 6 degree | 4 degree |      | 6 degree |



**TO-92 AMMOPACK SHIPMENT (Suffix"-AP") MECHANICAL DATA**

| DIM.    | mm    |       |       | inch   |       |       |
|---------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
|         | MIN.  | TYP.  | MAX.  | MIN.   | TYP.  | MAX.  |
| A1      |       |       | 4.80  |        |       | 0.189 |
| T       |       |       | 3.80  |        |       | 0.150 |
| T1      |       |       | 1.60  |        |       | 0.063 |
| T2      |       |       | 2.30  |        |       | 0.091 |
| d       |       |       | 0.48  |        |       | 0.019 |
| P0      | 12.50 | 12.70 | 12.90 | 0.492  | 0.500 | 0.508 |
| P2      | 5.65  | 6.35  | 7.05  | 0.222  | 0.250 | 0.278 |
| F1,F2   | 2.44  | 2.54  | 2.94  | 0.096  | 0.100 | 0.116 |
| delta H | -2.00 |       | 2.00  | -0.079 |       | 0.079 |
| W       | 17.50 | 18.00 | 19.00 | 0.689  | 0.709 | 0.748 |
| W0      | 5.70  | 6.00  | 6.30  | 0.224  | 0.236 | 0.248 |
| W1      | 8.50  | 9.00  | 9.25  | 0.335  | 0.354 | 0.364 |
| W2      |       |       | 0.50  |        |       | 0.020 |
| H       | 18.50 |       | 20.50 | 0.728  |       | 0.807 |
| H0      | 15.50 | 16.00 | 16.50 | 0.610  | 0.630 | 0.650 |
| H1      |       |       | 25.00 |        |       | 0.984 |
| D0      | 3.80  | 4.00  | 4.20  | 0.150  | 0.157 | 0.165 |
| t       |       |       | 0.90  |        |       | 0.035 |
| L       |       |       | 11.00 |        |       | 0.433 |
| l1      | 3.00  |       |       | 0.118  |       |       |
| delta P | -1.00 |       | 1.00  | -0.039 |       | 0.039 |





Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specification mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

The ST logo is a trademark of STMicroelectronics

© 2003 STMicroelectronics – Printed in Italy – All Rights Reserved

STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES

Australia - Brazil - Canada - China - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Israel - Italy - Japan - Malaysia - Malta - Morocco - Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom - United States.

<http://www.st.com>

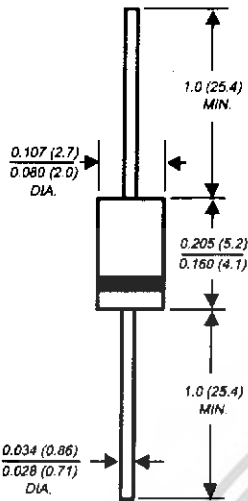


# 1N4001 THRU 1N4007

## GENERAL PURPOSE PLASTIC RECTIFIER

Reverse Voltage - 50 to 1000 Volts Forward Current - 1.0 Ampere

DO-204AL



NOTE: Lead diameter is 0.026 (0.66) for suffix "E" part numbers  
0.023 (0.58)

Dimensions in inches and (millimeters)

### FEATURES

- ◆ The plastic package carries Underwriters Laboratory Flammability Classification 94V-0
- ◆ Construction utilizes void-free molded plastic technique
- ◆ Low reverse leakage
- ◆ High forward surge current capability
- ◆ High temperature soldering guaranteed: 250°C/10 seconds, 0.375" (9.5mm) lead length, 5 lbs. (2.3kg) tension

### MECHANICAL DATA

**Case:** JEDEC DO-204AL molded plastic body

**Terminals:** Plated axial leads, solderable per MIL-STD-750, Method 2026

**Polarity:** Color band denotes cathode end

**Mounting Position:** Any

**Weight:** 0.012 ounce, 0.3 gram

### MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.

|   | SYMBOLS                            | 1N 4001      | 1N 4002 | 1N 4003 | 1N 4004 | 1N 4005 | 1N 4006 | 1N 4007 | UNITS              |
|---|------------------------------------|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------------|
| Maximum repetitive peak reverse voltage   | $V_{RRM}$                          | 50           | 100     | 200     | 400     | 600     | 800     | 1000    | Volts              |
| Maximum RMS voltage   | $V_{RMS}$                          | 35           | 70      | 140     | 280     | 420     | 560     | 700     | Volts              |
| Maximum DC blocking voltage   | $V_{DC}$                           | 50           | 100     | 200     | 400     | 600     | 800     | 1000    | Volts              |
| Maximum average forward rectified current (0.375" (9.5mm) lead length at $T_A=75^\circ\text{C}$ )                     | $I_{(AV)}$                         | 1.0          |         |         |         |         |         |         | Amp                |
| Peak forward surge current (rms single half sine-wave superimposed on no load (JEDEC Method) $T_A=75^\circ\text{C}$ ) | $I_{FSM}$                          | 30.0         |         |         |         |         |         |         | Amps               |
| Maximum instantaneous forward voltage at 1.0A   | $V_F$                              | 1.1          |         |         |         |         |         |         | Volts              |
| Maximum full load reverse current (cycle average 0.375" (9.5mm) lead length at $T_L=75^\circ\text{C}$ )               | $I_{R(AV)}$                        | 30.0         |         |         |         |         |         |         | $\mu\text{A}$      |
| Maximum DC reverse current (rated DC blocking voltage) $T_A=25^\circ\text{C}$   | $I_R$                              | 5.0          |         |         |         |         |         |         | $\mu\text{A}$      |
| $T_A=100^\circ\text{C}$   |                                    | 50.0         |         |         |         |         |         |         |                    |
| Typical reverse recovery time (NOTE 1)  | $t_{rr}$                           | 30.0         |         |         |         |         |         |         | $\mu\text{s}$      |
| Typical junction capacitance (NOTE 2)   | $C_J$                              | 15.0         |         |         |         |         |         |         | pF                 |
| Typical thermal resistance (NOTE 3)   | $R_{\theta JA}$<br>$R_{\theta JL}$ | 50.0<br>25.0 |         |         |         |         |         |         | $^\circ\text{C/W}$ |
| Maximum DC blocking voltage temperature   | $T_A$                              | +150         |         |         |         |         |         |         | $^\circ\text{C}$   |
| Operating junction and storage temperature range  | $T_J, T_{STG}$                     | -50 to +175  |         |         |         |         |         |         | $^\circ\text{C}$   |

**Notes:**  
 1. Measured on Tektronix Type "S" recovery plug-in. Tektronix 545 Scope or equivalent,  $I_{FM}=20\text{mA}$ ,  $I_{RM}=1\text{mA}$   
 2. Measured at 1.0 MHz and applied reverse voltage of 4.0 Volts  
 3. Thermal resistance from junction to ambient and from junction to lead at 0.375" (9.5mm) lead length, P.C.B. mounted  
 4. C registered value

# RATINGS AND CHARACTERISTIC CURVES 1N4001 THRU 1N4007

FIG. 1 - FORWARD CURRENT DERATING CURVE

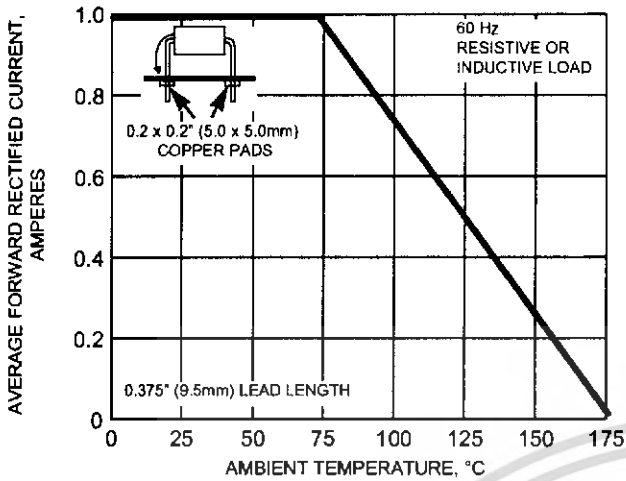


FIG. 2 - MAXIMUM NON-REPETITIVE PEAK FORWARD SURGE CURRENT

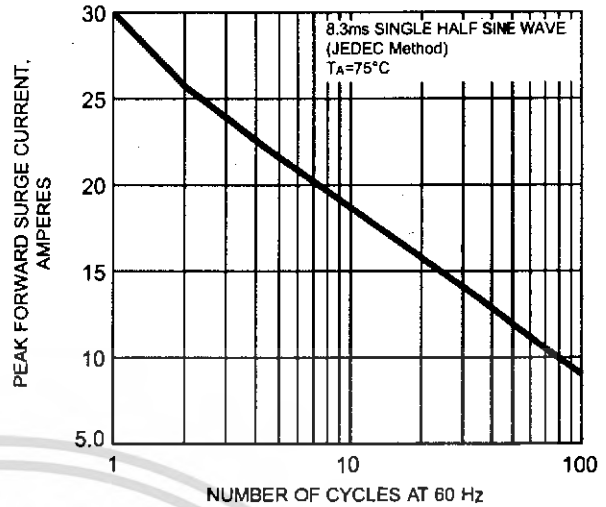


FIG. 3 - TYPICAL INSTANTANEOUS FORWARD CHARACTERISTICS

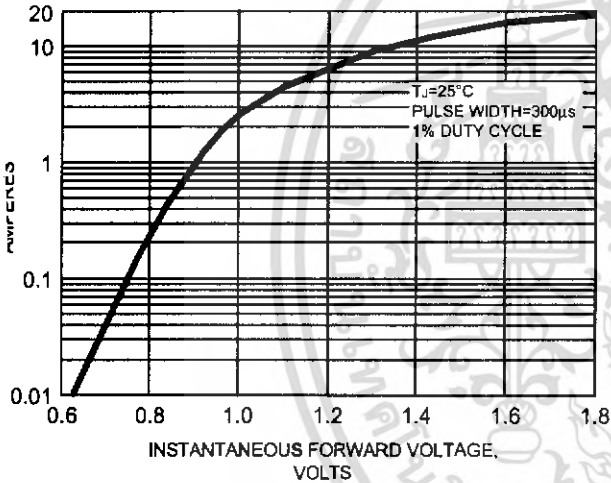


FIG. 4 - TYPICAL REVERSE CHARACTERISTICS

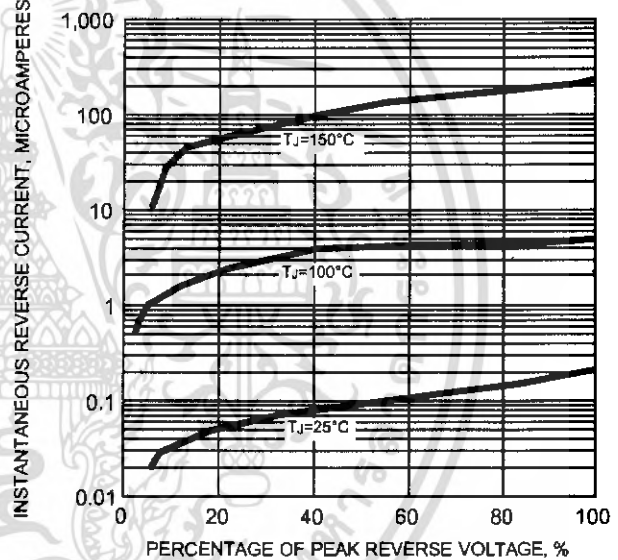


FIG. 5 - TYPICAL JUNCTION CAPACITANCE

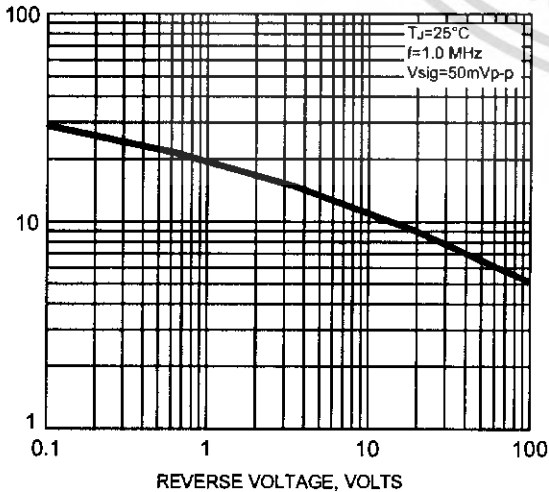
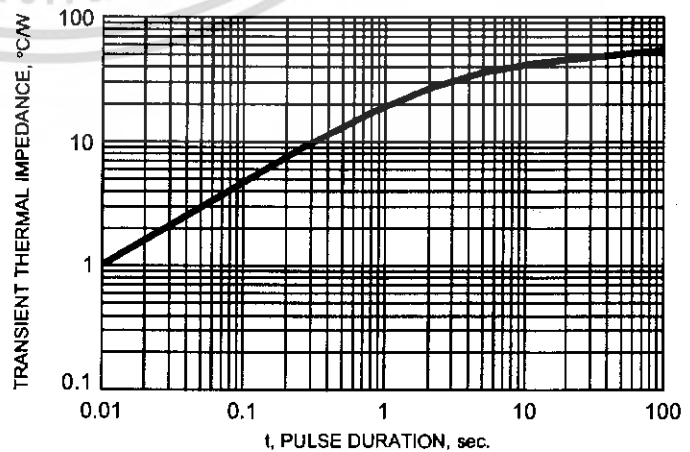


FIG. 6 - TYPICAL TRANSIENT THERMAL IMPEDANCE





# LM158,A-LM258,A LM358,A

## LOW POWER DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS

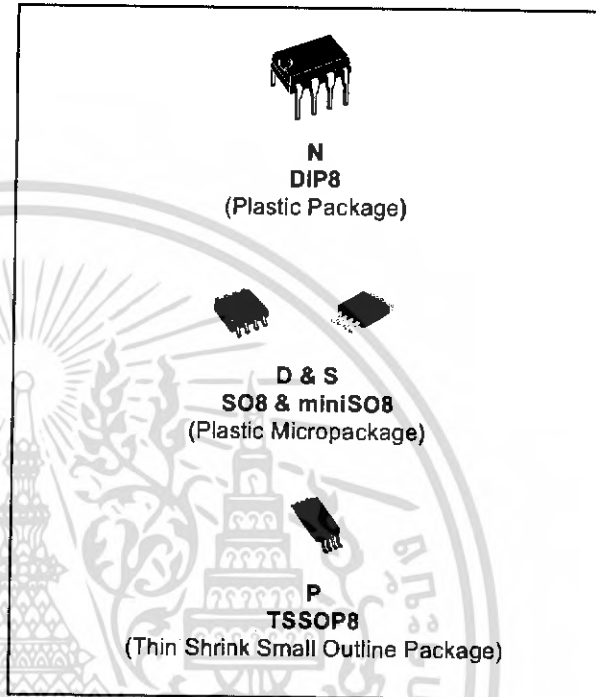
- INTERNALLY FREQUENCY COMPENSATED
- LARGE DC VOLTAGE GAIN: 100dB
- WIDE BANDWIDTH (unity gain): 1.1MHz (temperature compensated)
- VERY LOW SUPPLY CURRENT/OP (500µA) ESSENTIALLY INDEPENDENT OF SUPPLY VOLTAGE
- LOW INPUT BIAS CURRENT: 20nA (temperature compensated)
- LOW INPUT OFFSET VOLTAGE: 2mV
- LOW INPUT OFFSET CURRENT: 2nA
- INPUT COMMON-MODE VOLTAGE RANGE INCLUDES GROUND
- DIFFERENTIAL INPUT VOLTAGE RANGE EQUAL TO THE POWER SUPPLY VOLTAGE
- LARGE OUTPUT VOLTAGE SWING 0V TO (V<sub>cc</sub> - 1.5V)

### DESCRIPTION

These circuits consist of two independent, high gain, internally frequency compensated which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages. The low power supply drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

Application areas include transducer amplifiers, dc gain blocks and all the conventional op-amp circuits which now can be more easily implemented in single power supply systems. For example, these circuits can be directly supplied with the standard +5V which is used in logic systems and will easily provide the required interface electronics without requiring any additional power supply.

In the linear mode the input common-mode voltage range includes ground and the output voltage can also swing to ground, even though operated from only a single power supply voltage.



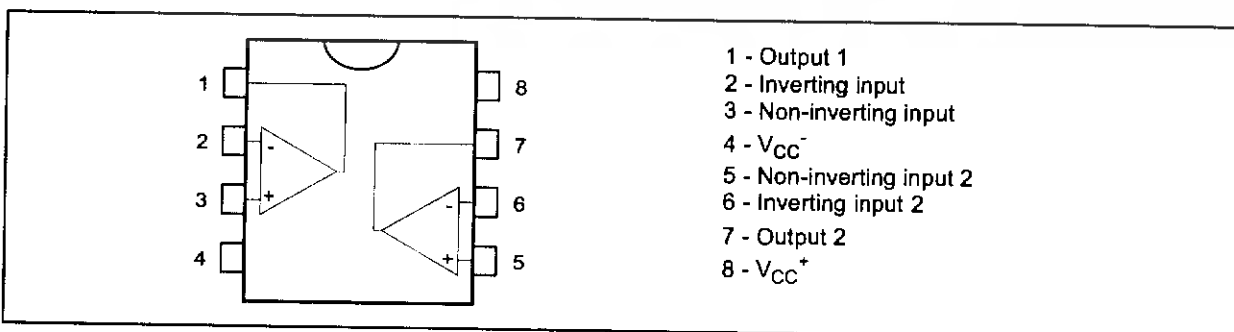
### ORDER CODE

| Part Number | Temperature Range | Package |   |   |   |
|-------------|-------------------|---------|---|---|---|
|             |                   | N       | S | D | P |
| LM158,A     | -55°C, +125°C     | •       |   | • | • |
| LM258,A     | -40°C, +105°C     | •       |   | • | • |
| LM358,A     | 0°C, +70°C        | •       | • | • | • |

Example : LM258N

N = Dual in Line Package (DIP)  
 D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)  
 S = Small Outline Package (miniSO) only available in Tape & Reel (DT)  
 P = Thin Shrink Small Outline Package (TSSOP) - only available in Tape & Reel (PT)

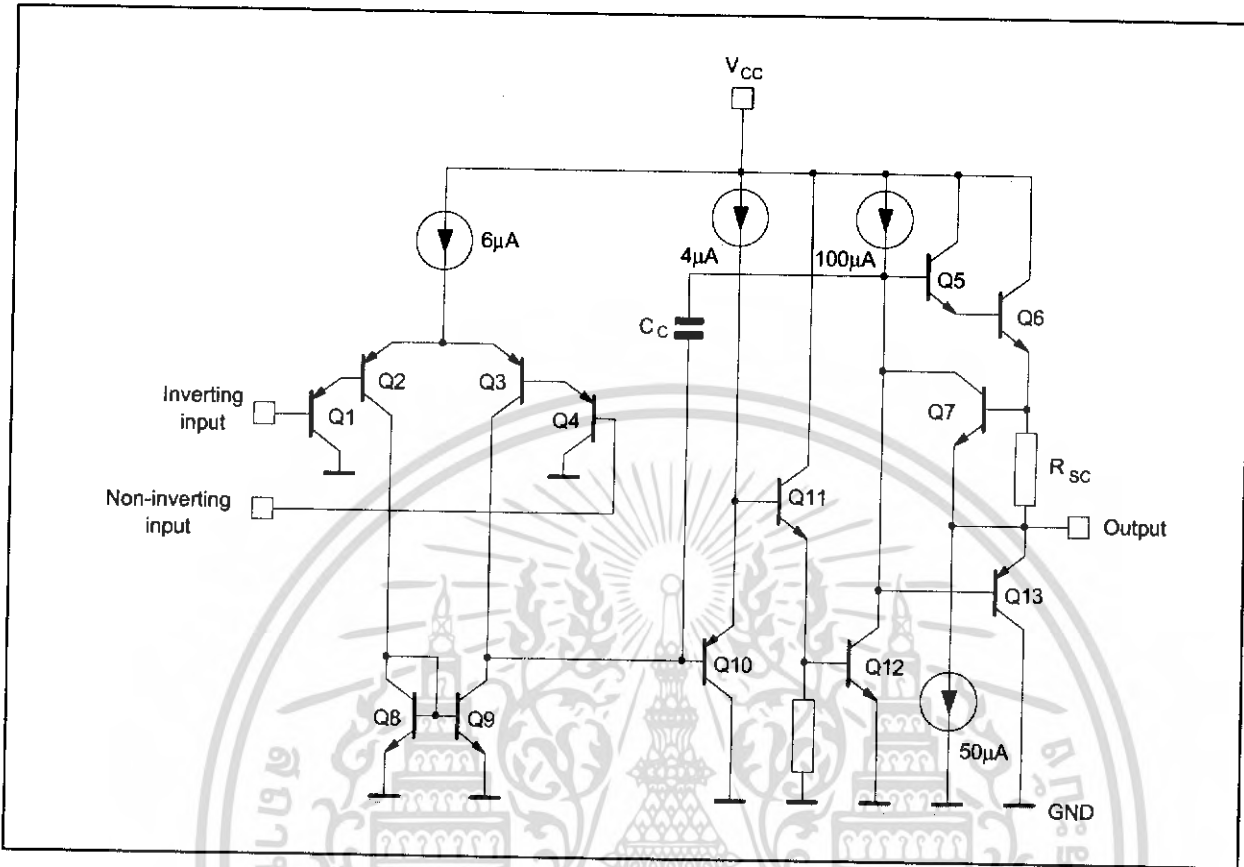
### PIN CONNECTIONS (top view)



July 2003

1/12

**SCHEMATIC DIAGRAM (1/2 LM158)**



**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

| Symbol     | Parameter                                   | LM158,A     | LM258,A     | LM358,A  | Unit |
|------------|---|-------------|-------------|----------|------|
| $V_{CC}$   | Supply voltage                              |             | +/-16 or 32 |          | V    |
| $V_i$      | Input Voltage                               |             | -0.3 to +32 |          | V    |
| $V_{id}$   | Differential Input Voltage                  |             | +32         |          | V    |
| $P_{tot}$  | Power Dissipation <sup>1)</sup>             |             | 500         |          | mW   |
|            | Output Short-circuit Duration <sup>2)</sup> |             | Infinite    |          |      |
| $I_{in}$   | Input Current <sup>3)</sup>                 |             | 50          |          | mA   |
| $T_{oper}$ | Operating Free-air Temperature Range        | -55 to +125 | -40 to +105 | 0 to +70 | °C   |
| $T_{stg}$  | Storage Temperature Range                   |             | -65 to +150 |          | °C   |

1. Power dissipation must be considered to ensure maximum junction temperature ( $T_j$ ) is not exceeded.
2. Short-circuits from the output to  $V_{CC}$  can cause excessive heating if  $V_{CC} > 15V$ . The maximum output current is approximately 40mA independent of the magnitude of  $V_{CC}$ . Destructive dissipation can result from simultaneous short-circuit on all amplifiers.
3. This input current only exists when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistor becoming forward biased and thereby acting as input diodes clamps. In addition to this diode action, there is also NPN parasitic action on the IC chip. This transistor action can cause the output voltages of the Op-amps to go to the  $V_{CC}$  voltage level (or to ground for a large overdrive) for the time duration than an input is driven negative. This is not destructive and normal output will set up again for input voltage higher than -0.3V.

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

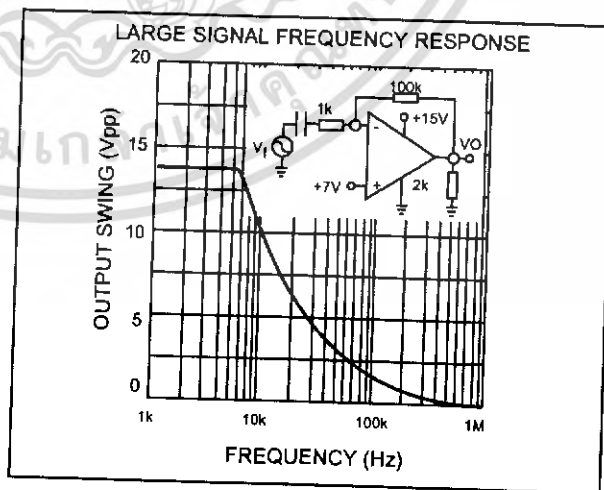
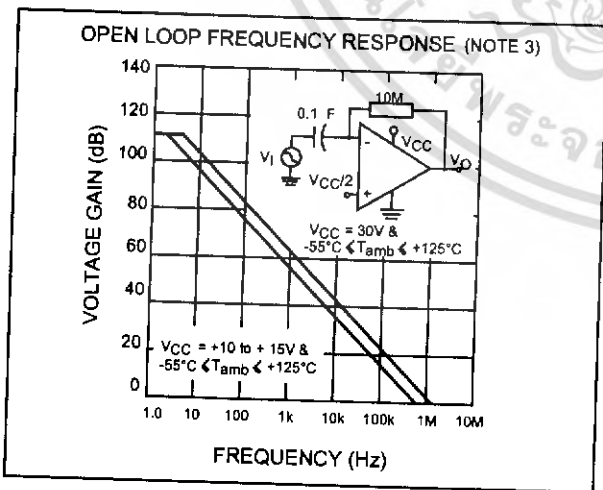
$V_{CC}^+ = +5V$ ,  $V_{CC}^- = \text{Ground}$ ,  $V_o = 1.4V$ ,  $T_{amb} = +25^\circ C$  (unless otherwise specified)

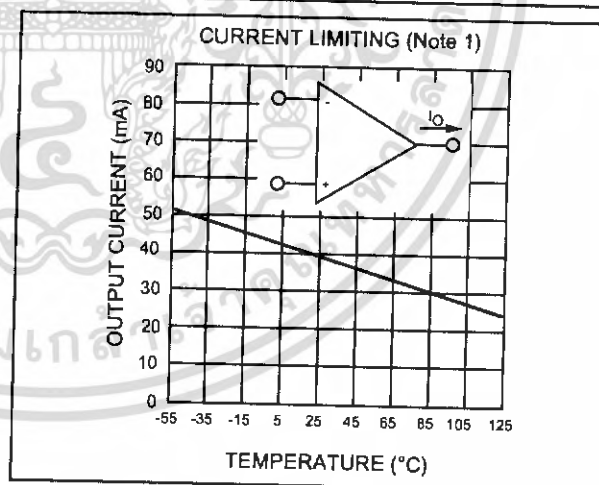
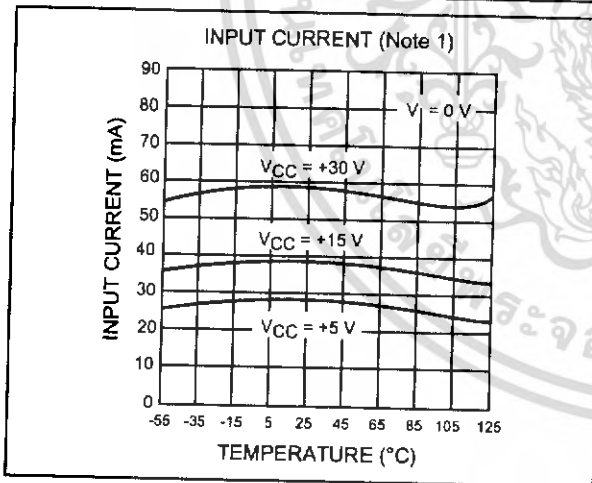
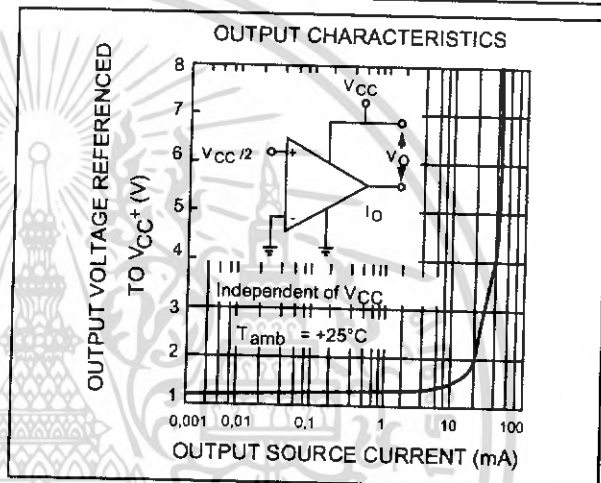
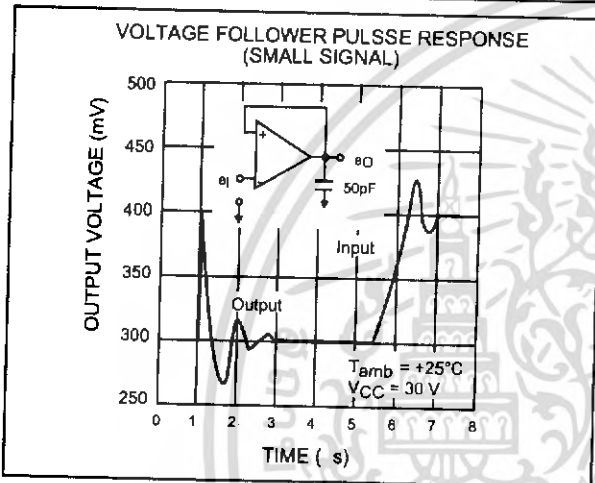
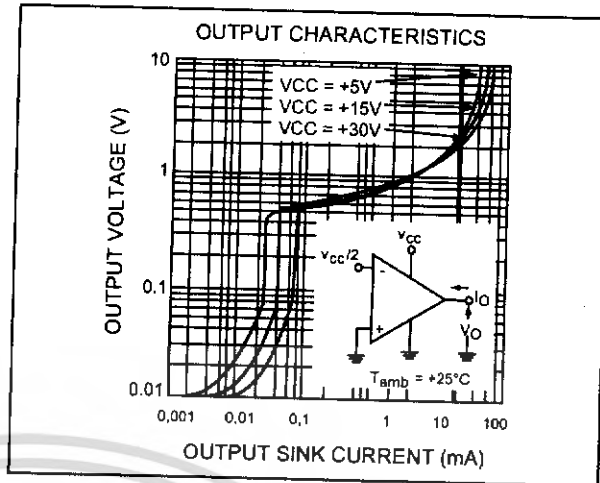
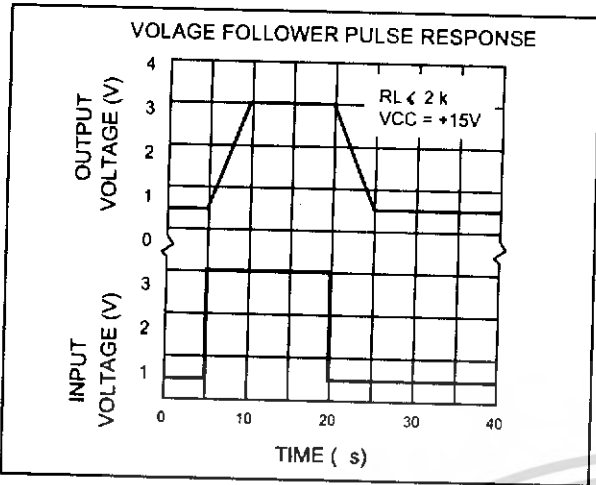
| Symbol       | Parameter   | LM158A-LM258A<br>LM358A |          |                                    | LM158-LM258<br>LM358 |          |                                    | Unit          |
|--------------|---|-------------------------|----------|------------------------------------|----------------------|----------|------------------------------------|---------------|
|              |   | Min.                    | Typ.     | Max.                               | Min.                 | Typ.     | Max.                               |               |
| $V_{io}$     | Input Offset Voltage - note 1)<br>$T_{amb} = +25^\circ C$<br><br>LM158, LM258<br>LM158A<br><br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$<br><br>LM158, LM258      |                         | 1        | 3<br>2<br>4                        |                      | 2        | 7<br>5<br>9<br>7                   | mV            |
| $I_{io}$     | Input Offset Current<br>$T_{amb} = +25^\circ C$<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$  |                         | 2        | 10<br>30                           |                      | 2        | 30<br>40                           | nA            |
| $I_{ib}$     | Input Bias Current - note 2)<br>$T_{amb} = +25^\circ C$<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$  |                         | 20       | 50<br>100                          |                      | 20       | 150<br>200                         | nA            |
| $A_{vd}$     | Large Signal Voltage Gain<br>$V_{CC} = +15V$ , $R_L = 2k\Omega$ , $V_o = 1.4V$ to $11.4V$<br>$T_{amb} = +25^\circ C$<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ | 50<br>25                | 100      |                                    | 50<br>25             | 100      |                                    | V/mV          |
| SVR          | Supply Voltage Rejection Ratio ( $R_s \leq 10k\Omega$ )<br>$V_{CC}^+ = 5V$ to $30V$<br>$T_{amb} = +25^\circ C$<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$       | 65<br>65                | 100      |                                    | 65<br>65             | 100      |                                    | dB            |
| $I_{CC}$     | Supply Current, all Amp, no load<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ $V_{CC} = +5V$<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ $V_{CC} = +30V$               |                         | 0.7      | 1.2<br>1                           |                      | 0.7      | 1.2<br>2                           | mA            |
| $V_{icm}$    | Input Common Mode Voltage Range<br>$V_{CC} = +30V$ - note 3)<br>$T_{amb} = +25^\circ C$<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$                              | 0<br>0                  |          | $V_{CC}^+ - 1.5$<br>$V_{CC}^+ - 2$ | 0<br>0               |          | $V_{CC}^+ - 1.5$<br>$V_{CC}^+ - 2$ | V             |
| CMR          | Common Mode Rejection Ratio ( $R_s \leq 10k\Omega$ )<br>$T_{amb} = +25^\circ C$<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$                                      | 70<br>60                | 85       |                                    | 70<br>60             | 85       |                                    | dB            |
| $I_{source}$ | Output Current Source<br>$V_{CC} = +15V$ , $V_o = +2V$ , $V_{id} = +1V$   | 20                      | 40       | 60                                 | 20                   | 40       | 60                                 | mA            |
| $I_{sink}$   | Output Sink Current ( $V_{id} = -1V$ )<br>$V_{CC} = +15V$ , $V_o = +2V$<br>$V_{CC} = +15V$ , $V_o = +0.2V$  | 10<br>12                | 20<br>50 |                                    | 10<br>12             | 20<br>50 |                                    | mA<br>$\mu A$ |
| $V_{OPP}$    | Output Voltage Swing ( $R_L = 2k\Omega$ )<br>$T_{amb} = +25^\circ C$<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$   | 0<br>0                  |          | $V_{CC}^+ - 1.5$<br>$V_{CC}^+ - 2$ | 0<br>0               |          | $V_{CC}^+ - 1.5$<br>$V_{CC}^+ - 2$ |               |

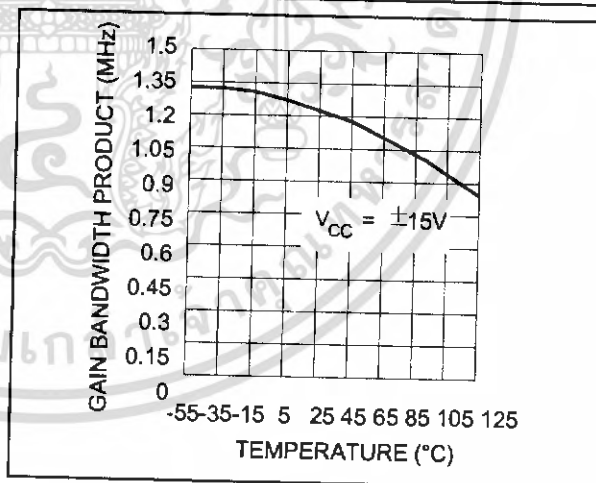
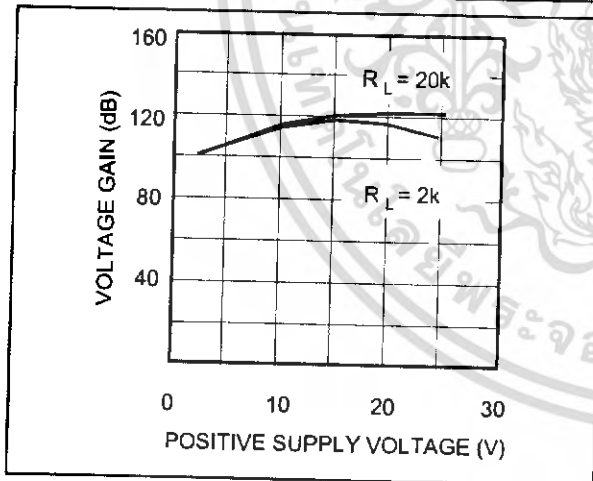
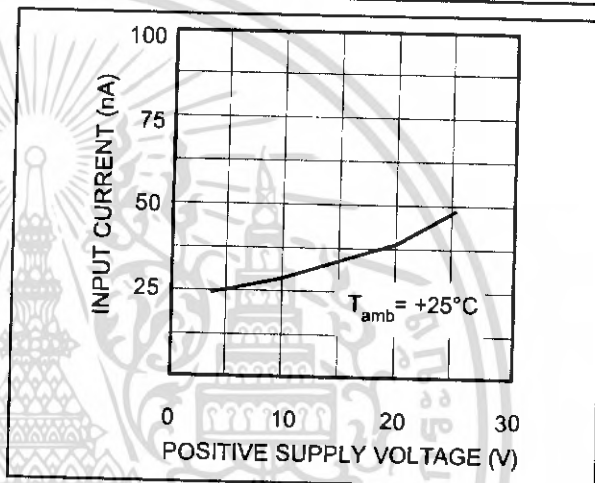
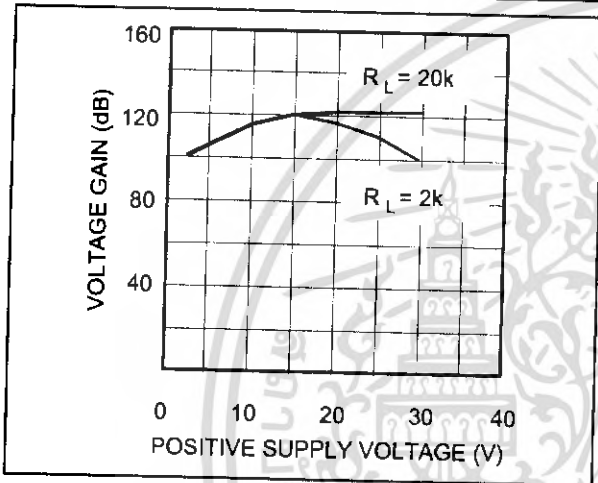
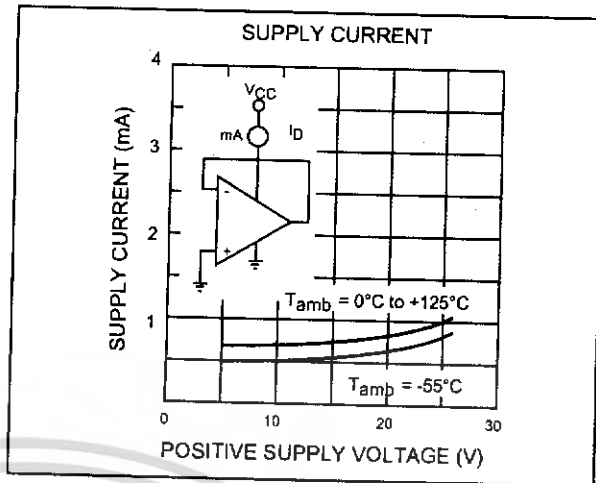
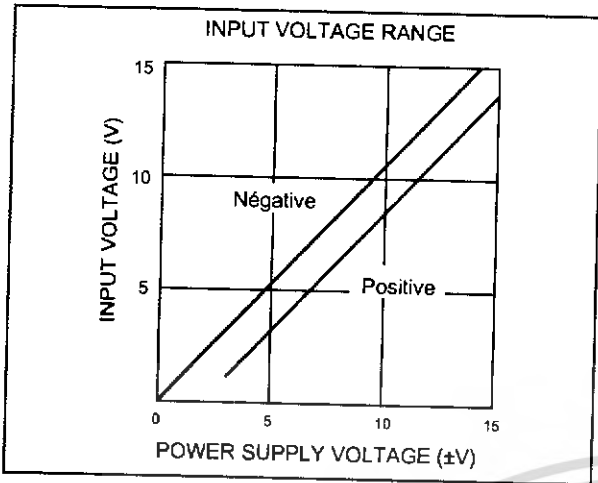


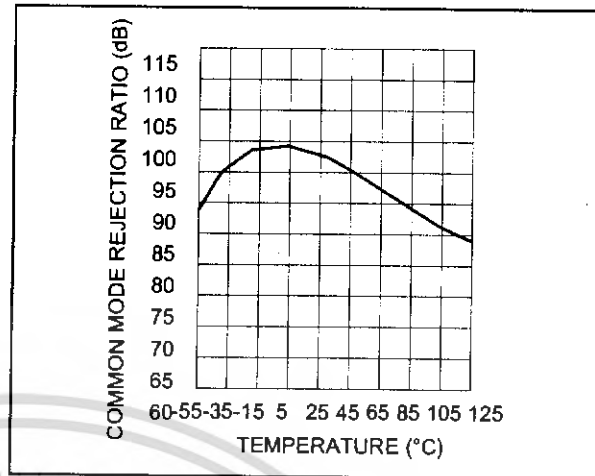
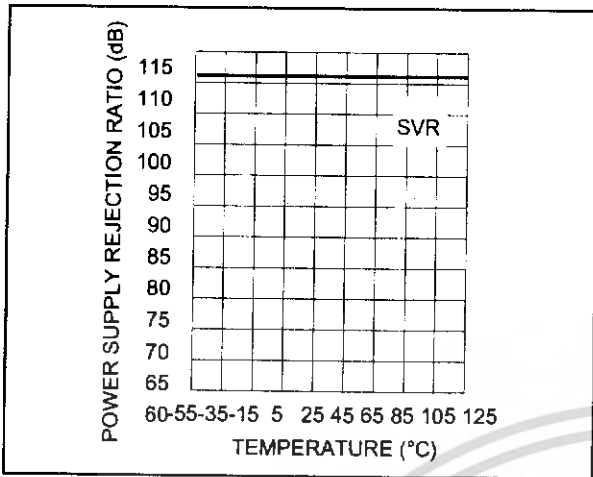
| Symbol                           | Parameter  | LM158A-LM258A<br>LM358A |      |          | LM158-LM258<br>LM358 |               |      | Unit                   |
|----------------------------------|--|-------------------------|------|----------|----------------------|---------------|------|------------------------|
|                                  |  | Min.                    | Typ. | Max.     | Min.                 | Typ.          | Max. |                        |
| V <sub>OH</sub>                  | High Level Output Voltage (V <sub>CC</sub> <sup>+</sup> = 30V)<br>T <sub>amb</sub> = +25°C<br>R <sub>L</sub> = 2kΩ   | 26                      | 27   |          | 26                   | 27            |      | V                      |
|                                  | T <sub>min</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max</sub><br>T <sub>amb</sub> = +25°C<br>R <sub>L</sub> = 10kΩ  | 26<br>27<br>27          | 28   |          | 26<br>27<br>27       | 28            |      |                        |
| V <sub>OL</sub>                  | Low Level Output Voltage (R <sub>L</sub> = 10kΩ)<br>T <sub>amb</sub> = +25°C<br>T <sub>min</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max</sub>   |                         | 5    | 20<br>20 |                      | 5<br>20<br>20 |      | mV                     |
| SR                               | Slew Rate<br>V <sub>CC</sub> = 15V, V <sub>i</sub> = 0.5 to 3V, R <sub>L</sub> = 2kΩ,<br>C <sub>L</sub> = 100pF, unity Gain  | 0.3                     | 0.6  |          | 0.3                  | 0.6           |      | V/μs                   |
| GBP                              | Gain Bandwidth Product<br>V <sub>CC</sub> = 30V, f = 100kHz, V <sub>in</sub> = 10mV, R <sub>L</sub> = 2kΩ,<br>C <sub>L</sub> = 100pF   | 0.7                     | 1.1  |          | 0.7                  | 1.1           |      | MHz                    |
| THD                              | Total Harmonic Distortion<br>f = 1kHz, A <sub>v</sub> = 20dB, R <sub>L</sub> = 2kΩ, V <sub>O</sub> = 2V <sub>pp</sub> ,<br>C <sub>L</sub> = 100pF, V <sub>O</sub> = 2V <sub>pp</sub> |                         | 0.02 |          |                      | 0.02          |      | %                      |
| e <sub>n</sub>                   | Equivalent Input Noise Voltage<br>f = 1kHz, R <sub>s</sub> = 100Ω, V <sub>CC</sub> = 30V   |                         | 55   |          |                      | 55            |      | $\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$ |
| DV <sub>io</sub>                 | Input Offset Voltage Drift   |                         | 7    | 15       |                      | 7             | 30   | μV/°C                  |
| DI <sub>io</sub>                 | Input Offset Current Drift   |                         | 10   | 200      |                      | 10            | 300  | pA/°C                  |
| V <sub>O1</sub> /V <sub>O2</sub> | Channel Separation - note 4)<br>1kHz ≤ f ≤ 20kHz   |                         | 120  |          |                      | 120           |      | dB                     |

- V<sub>O</sub> = 1.4V, R<sub>s</sub> = 0Ω, 5V < V<sub>CC</sub><sup>+</sup> < 30V, 0 < V<sub>ic</sub> < V<sub>CC</sub><sup>+</sup> - 1.5V
- The direction of the input current is out of the IC. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.
- The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3V. The upper end of the common-mode voltage range is V<sub>CC</sub> - 1.5V, but either or both inputs can go to +32V without damage.
- Due to the proximity of external components insure that coupling is not originating via stray capacitance between these external parts. This typically can be detected as this type of capacitance increases at higher frequencies.



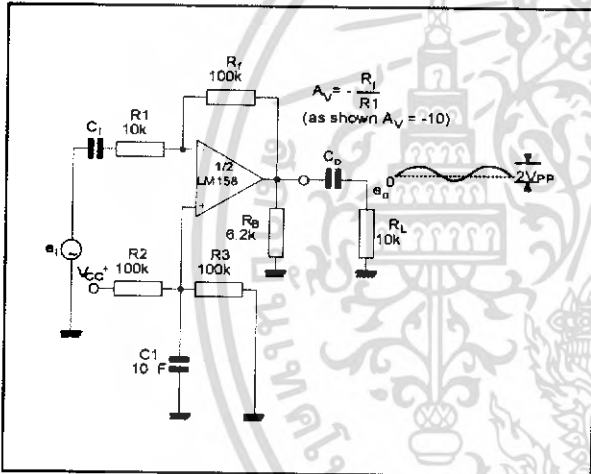




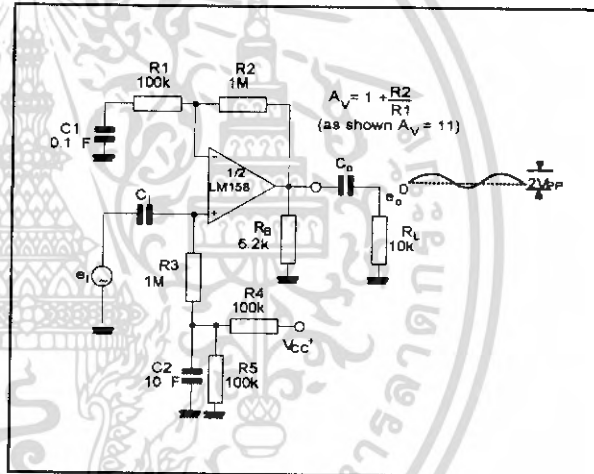


TYPICAL APPLICATIONS (single supply voltage)  $V_{cc} = +5V_{dc}$

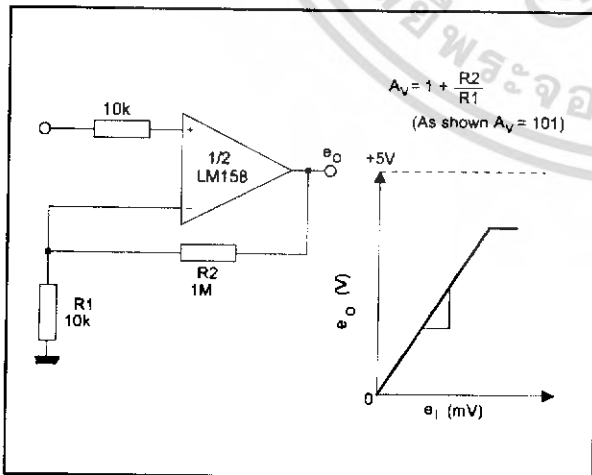
AC COUPLED INVERTING AMPLIFIER



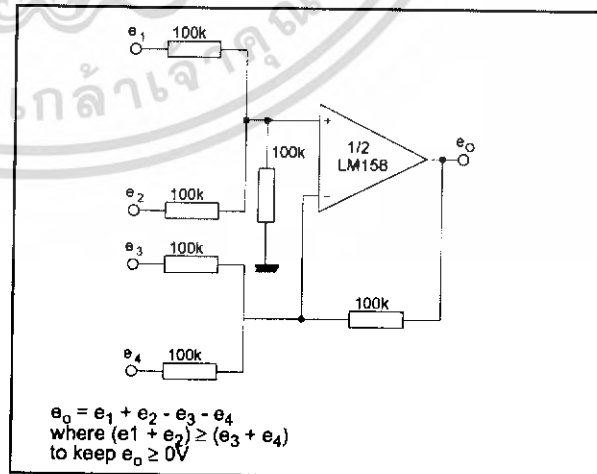
AC COUPLED NON-INVERTING AMPLIFIER



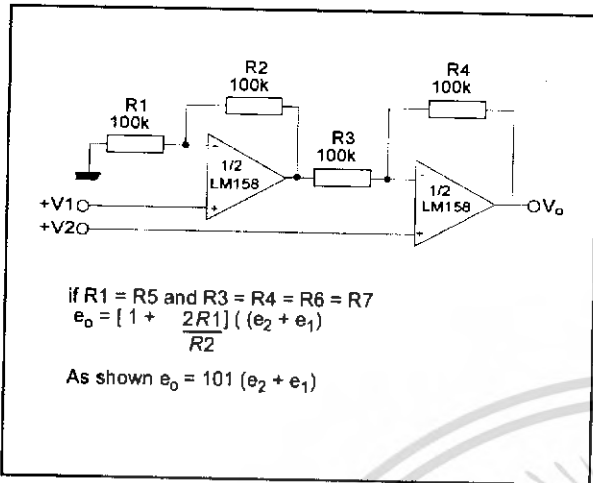
NON-INVERTING DC AMPLIFIER



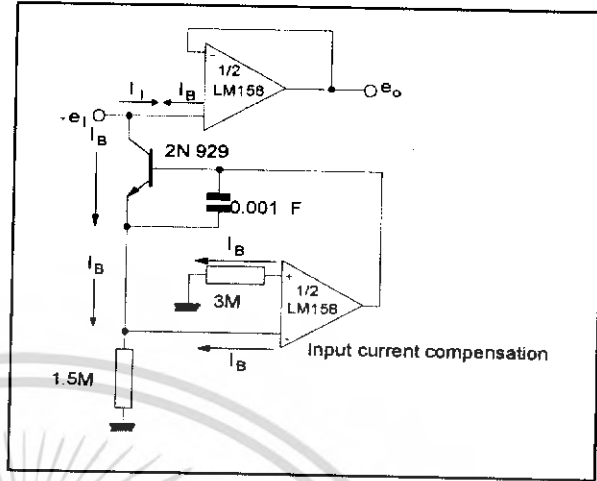
DC SUMMING AMPLIFIER



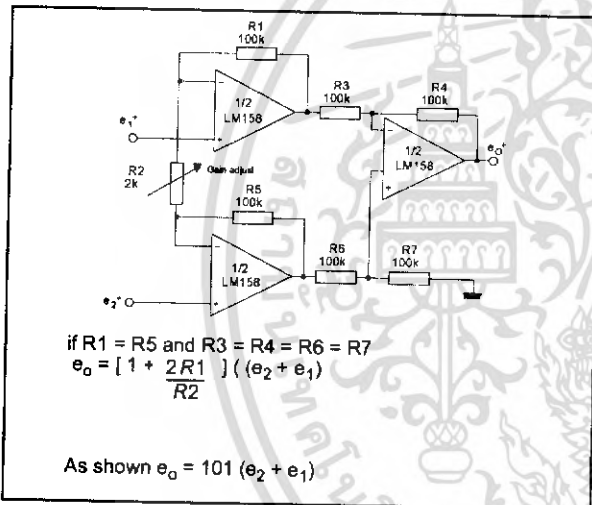
HIGH INPUT Z, DC DIFFERENTIAL AMPLIFIER



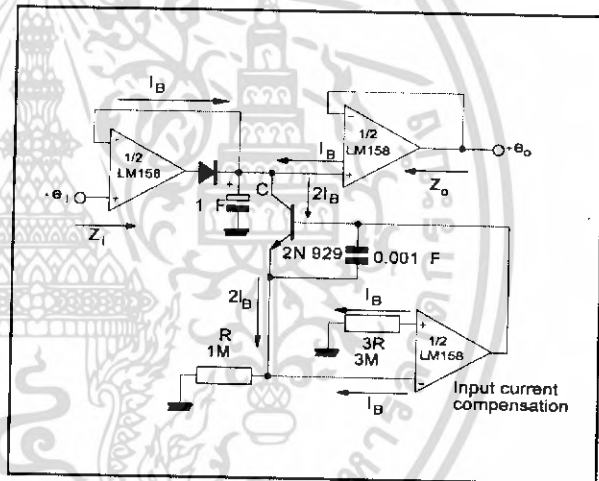
USING SYMMETRICAL AMPLIFIERS TO REDUCE INPUT CURRENT



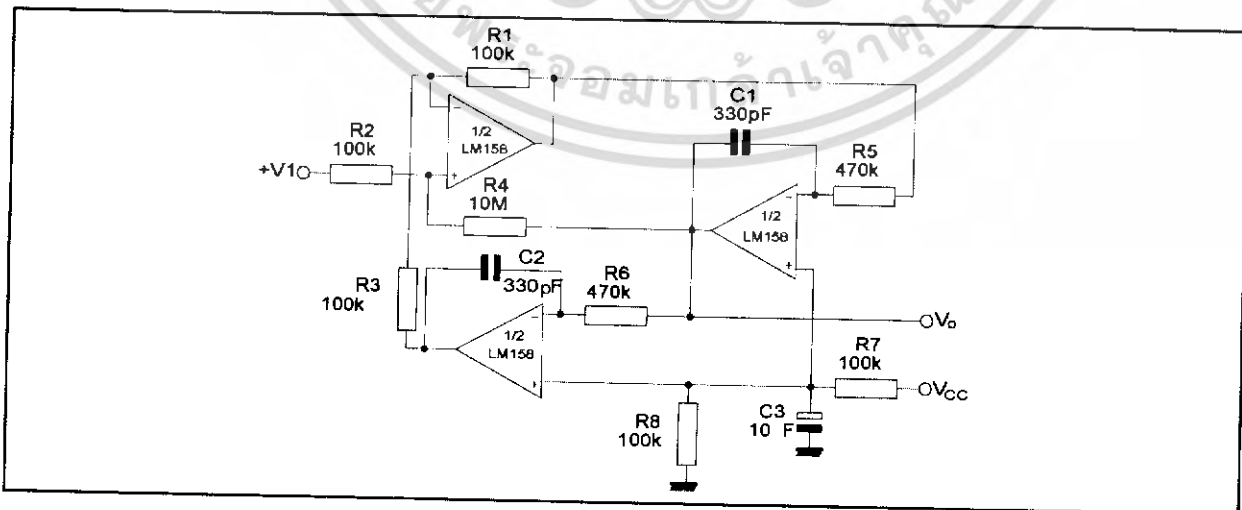
HIGH INPUT Z ADJUSTABLE GAIN DC INSTRUMENTATION AMPLIFIER



LOW DRIFT PEAK DETECTOR



ACTIVE BAND-PASS FILTER



# LM741 Operational Amplifier

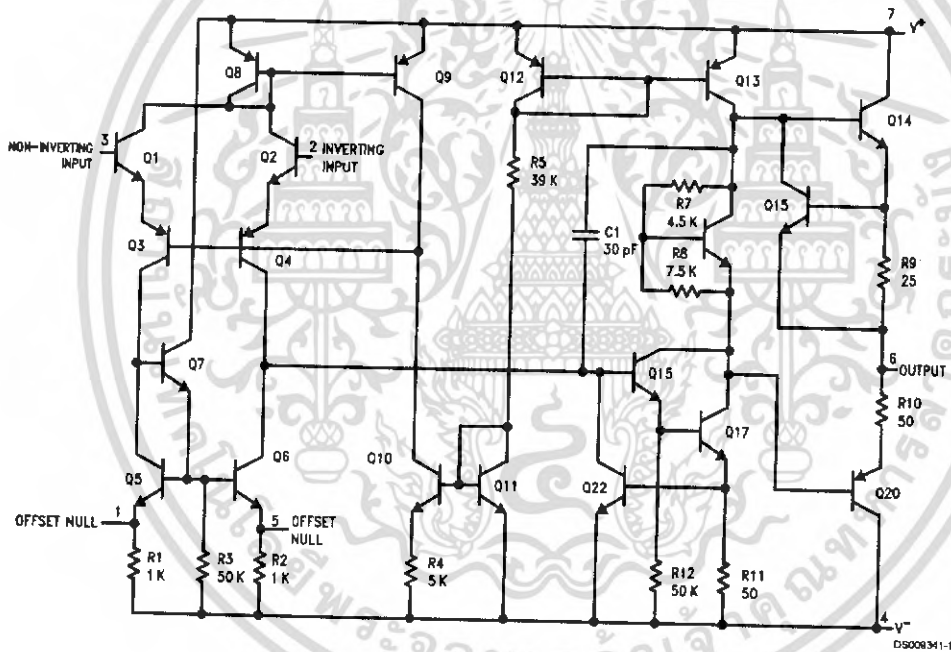
## General Description

The LM741 series are general purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1439 and 748 in most applications.

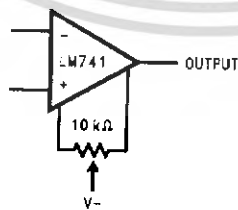
The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload protection on the input and output, no latch-up when the common mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

The LM741C/LM741E are identical to the LM741/LM741A except that the LM741C/LM741E have their performance guaranteed over a 0°C to +70°C temperature range, instead of -55°C to +125°C.

## Schematic Diagram



Offset Nulling Circuit



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Absolute Maximum Ratings (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.  
(Note 6)

|   | LM741A          | LM741E          | LM741           | LM741C          |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Supply Voltage  | ±22V            | ±22V            | ±22V            | ±18V            |
| Power Dissipation (Note 2)  | 500 mW          | 500 mW          | 500 mW          | 500 mW          |
| Differential Input Voltage  | ±30V            | ±30V            | ±30V            | ±30V            |
| Input Voltage (Note 3)  | ±15V            | ±15V            | ±15V            | ±15V            |
| Output Short Circuit Duration   | Continuous      | Continuous      | Continuous      | Continuous      |
| Operating Temperature Range   | -55°C to +125°C | 0°C to +70°C    | -55°C to +125°C | 0°C to +70°C    |
| Storage Temperature Range   | -65°C to +150°C | -65°C to +150°C | -65°C to +150°C | -65°C to +150°C |
| Junction Temperature  | 150°C           | 100°C           | 150°C           | 100°C           |
| Soldering Information   |                 |                 |                 |                 |
| N-Package (10 seconds)  | 260°C           | 260°C           | 260°C           | 260°C           |
| J- or H-Package (10 seconds)  | 300°C           | 300°C           | 300°C           | 300°C           |
| M-Package   |                 |                 |                 |                 |
| Vapor Phase (60 seconds)  | 215°C           | 215°C           | 215°C           | 215°C           |
| Infrared (15 seconds)   | 215°C           | 215°C           | 215°C           | 215°C           |
| See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices. |                 |                 |                 |                 |
| ESD Tolerance (Note 7)  | 400V            | 400V            | 400V            | 400V            |

## Electrical Characteristics (Note 4)

| Parameter                             | Conditions   | LM741A/LM741E |     |       | LM741 |     |     | LM741C |     |     | Units                        |
|---------------------------------------|--|---------------|-----|-------|-------|-----|-----|--------|-----|-----|------------------------------|
|                                       |  | Min           | Typ | Max   | Min   | Typ | Max | Min    | Typ | Max |                              |
| Input Offset Voltage                  | $T_A = 25^\circ\text{C}$<br>$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$<br>$R_S \leq 50\Omega$          |               | 0.8 | 3.0   |       | 1.0 | 5.0 |        | 2.0 | 6.0 | mV                           |
|                                       | $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$<br>$R_S \leq 50\Omega$<br>$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$ |               |     | 4.0   |       |     | 6.0 |        |     | 7.5 | mV                           |
|                                       |  |               |     | 15    |       |     |     |        |     |     | $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ |
| Average Input Offset Voltage Drift    |  |               |     | 15    |       |     |     |        |     |     | $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ |
| Input Offset Voltage Adjustment Range | $T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20\text{V}$   | ±10           |     |       | ±15   |     |     | ±15    |     |     | mV                           |
| Input Offset Current                  | $T_A = 25^\circ\text{C}$   |               | 3.0 | 30    |       | 20  | 200 |        | 20  | 200 | nA                           |
|                                       | $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$  |               |     | 70    |       | 85  | 500 |        |     | 300 | nA                           |
| Average Input Offset Current Drift    |  |               |     | 0.5   |       |     |     |        |     |     | $\text{nA}/^\circ\text{C}$   |
| Input Bias Current                    | $T_A = 25^\circ\text{C}$   |               | 30  | 80    |       | 80  | 500 |        | 80  | 500 | nA                           |
|                                       | $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$  |               |     | 0.210 |       |     | 1.5 |        |     | 0.8 | $\mu\text{A}$                |
| Input Resistance                      | $T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20\text{V}$   | 1.0           | 6.0 |       | 0.3   | 2.0 |     | 0.3    | 2.0 |     | $\text{M}\Omega$             |
|                                       | $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$<br>$V_S = \pm 20\text{V}$                              | 0.5           |     |       |       |     |     |        |     |     | $\text{M}\Omega$             |
|                                       |  |               |     |       |       |     |     |        |     |     |                              |
| Input Voltage Range                   | $T_A = 25^\circ\text{C}$   |               |     |       |       |     |     | ±12    | ±13 |     | V                            |
|                                       | $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$  |               |     |       | ±12   | ±13 |     |        |     |     | V                            |

### Electrical Characteristics (Note 4) (Continued)

| Parameter                      | Conditions   | LM741A/LM741E                              |      |     | LM741                |                      |     | LM741C               |                      |     | Units            |    |
|--------------------------------|--|--|------|-----|----------------------|----------------------|-----|----------------------|----------------------|-----|------------------|----|
|                                |  | Min  | Typ  | Max | Min                  | Typ                  | Max | Min                  | Typ                  | Max |                  |    |
| Large Signal Voltage Gain      | $T_A = 25^\circ\text{C}$ , $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$<br>$V_S = \pm 20\text{V}$ , $V_O = \pm 15\text{V}$<br>$V_S = \pm 15\text{V}$ , $V_O = \pm 10\text{V}$             | 50   |      |     | 50                   | 200                  |     | 20                   | 200                  |     | V/mV<br>V/mV     |    |
|                                | $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$<br>$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ ,<br>$V_S = \pm 20\text{V}$ , $V_O = \pm 15\text{V}$<br>$V_S = \pm 15\text{V}$ , $V_O = \pm 10\text{V}$ | 32   |      |     | 25                   |                      |     | 15                   |                      |     | V/mV<br>V/mV     |    |
|                                | $V_S = \pm 5\text{V}$ , $V_O = \pm 2\text{V}$  | 10   |      |     |                      |                      |     |                      |                      |     | V/mV             |    |
| Output Voltage Swing           | $V_S = \pm 20\text{V}$<br>$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$<br>$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$  | $\pm 16$                                   |      |     |                      |                      |     |                      |                      |     | V<br>V           |    |
|                                | $V_S = \pm 15\text{V}$<br>$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$<br>$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$  |  |      |     | $\pm 12$<br>$\pm 10$ | $\pm 14$<br>$\pm 13$ |     | $\pm 12$<br>$\pm 10$ | $\pm 14$<br>$\pm 13$ |     | V<br>V           |    |
|                                |  |  |      |     |                      |                      |     |                      |                      |     |                  |    |
|                                |  |  |      |     |                      |                      |     |                      |                      |     |                  |    |
| Output Short Circuit Current   | $T_A = 25^\circ\text{C}$   | 10   | 25   | 35  |                      |                      |     |                      |                      |     | mA               |    |
|                                | $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$  | 10   |      | 40  |                      |                      |     |                      | 25                   |     | mA               |    |
| Common-Mode Rejection Ratio    | $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$<br>$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$ , $V_{CM} = \pm 12\text{V}$<br>$R_S \leq 50\Omega$ , $V_{CM} = \pm 12\text{V}$                         | 80   | 95   |     | 70                   | 90                   |     | 70                   | 90                   |     | dB<br>dB         |    |
|                                |  |  |      |     |                      |                      |     |                      |                      |     |                  |    |
| Supply Voltage Rejection Ratio | $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$<br>$V_S = \pm 20\text{V}$ to $V_S = \pm 5\text{V}$<br>$R_S \leq 50\Omega$<br>$R_S \leq 10\text{ k}\Omega$                              | 86   | 96   |     | 77                   | 96                   |     | 77                   | 96                   |     | dB<br>dB         |    |
|                                |  |  |      |     |                      |                      |     |                      |                      |     |                  |    |
| Transient Response             | $T_A = 25^\circ\text{C}$ , Unity Gain  | Rise Time                                  | 0.25 | 0.8 |                      | 0.3                  |     | 0.3                  |                      |     | $\mu\text{s}$    |    |
|                                |  | Overshoot                                  | 6.0  | 20  |                      | 5                    |     | 5                    |                      |     | %                |    |
| Bandwidth (Note 5)             | $T_A = 25^\circ\text{C}$   | 0.437                                      | 1.5  |     |                      |                      |     |                      |                      |     | MHz              |    |
| Slew Rate                      | $T_A = 25^\circ\text{C}$ , Unity Gain  | 0.3  | 0.7  |     |                      | 0.5                  |     | 0.5                  |                      |     | V/ $\mu\text{s}$ |    |
| Supply Current                 | $T_A = 25^\circ\text{C}$   |  |      |     |                      | 1.7                  | 2.8 |                      | 1.7                  | 2.8 | mA               |    |
| Power Consumption              | $T_A = 25^\circ\text{C}$<br>$V_S = \pm 20\text{V}$<br>$V_S = \pm 15\text{V}$   |  | 80   | 150 |                      |                      |     |                      |                      |     | mW<br>mW         |    |
|                                |  |  |      |     |                      |                      |     |                      |                      |     |                  |    |
|                                | LM741A   | $V_S = \pm 20\text{V}$<br>$T_A = T_{AMIN}$ |      |     | 165                  |                      |     |                      |                      |     |                  | mW |
|                                |  | $T_A = T_{AMAX}$                           |      |     | 135                  |                      |     |                      |                      |     |                  | mW |
|                                | LM741E   | $V_S = \pm 20\text{V}$<br>$T_A = T_{AMIN}$ |      |     | 150                  |                      |     |                      |                      |     |                  | mW |
|                                |  | $T_A = T_{AMAX}$                           |      |     | 150                  |                      |     |                      |                      |     |                  | mW |
|                                | LM741  | $V_S = \pm 15\text{V}$<br>$T_A = T_{AMIN}$ |      |     |                      | 60                   | 100 |                      |                      |     |                  | mW |
|                                |  | $T_A = T_{AMAX}$                           |      |     |                      | 45                   | 75  |                      |                      |     |                  | mW |

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Electrical Characteristics (Note 4) (Continued)

**Note 2:** For operation at elevated temperatures, these devices must be derated based on thermal resistance, and  $T_j$  max. (listed under "Absolute Maximum Ratings"):  $T_j = T_A + (\theta_{JA} P_D)$ .

| Thermal Resistance                  | CerDip (J) | DIP (N) | HO8 (H) | SO-8 (M) |
|-------------------------------------|------------|---------|---------|----------|
| $\theta_{JA}$ (Junction to Ambient) | 100°C/W    | 100°C/W | 170°C/W | 195°C/W  |
| $\theta_{JC}$ (Junction to Case)    | N/A        | N/A     | 25°C/W  | N/A      |

**Note 3:** For supply voltages less than  $\pm 15V$ , the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

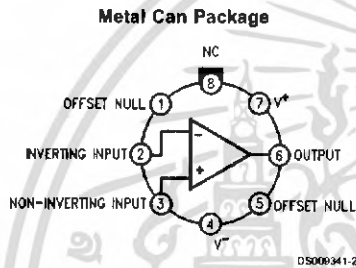
**Note 4:** Unless otherwise specified, these specifications apply for  $V_S = \pm 15V$ ,  $-55^\circ C \leq T_A \leq +125^\circ C$  (LM741/LM741A). For the LM741C/LM741E, these specifications are limited to  $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$ .

**Note 5:** Calculated value from: BW (MHz) = 0.35/Rise Time( $\mu s$ ).

**Note 6:** For military specifications see RETS741X for LM741 and RETS741AX for LM741A.

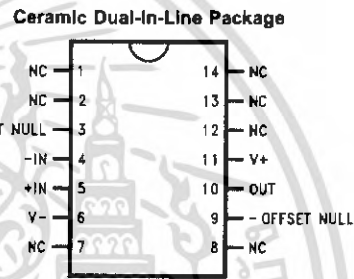
**Note 7:** Human body model, 1.5 k $\Omega$  in series with 100 pF.

## Connection Diagram



**Note 8:** LM741H is available per JM38510/10101

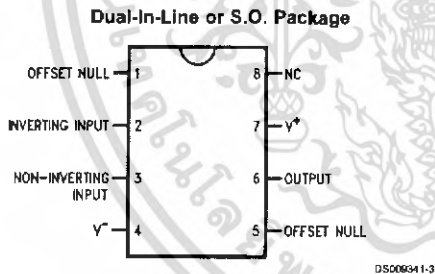
**Order Number LM741H, LM741H/883 (Note 8),  
LM741AH/883 or LM741CH  
See NS Package Number H08C**



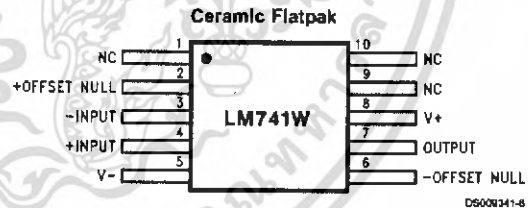
**Note 9:** also available per JM38510/10101

**Note 10:** also available per JM38510/10102

**Order Number LM741J-14/883 (Note 9),  
LM741AJ-14/883 (Note 10)  
See NS Package Number J14A**



**Order Number LM741J, LM741J/883,  
LM741CM, LM741CN or LM741EN  
See NS Package Number J08A, M08A or N08E**



**Order Number LM741W/883  
See NS Package Number W10A**