

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานโครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประจำปี 2552

เรื่อง
หัววัดอุณหภูมิด้วยปรากฏการณ์อวาแลนซ์และทันเนลลิงในรอยต่อพีเอ็น
และการประยุกต์ใช้งานกับเครื่องวัดคุณสมบัติทางอุณหภูมิ
Temperature detector by avalanche and tunneling effect of pn
junction and application for temperature characterization
apparatus

RCH

TK

7874-86

๓ ๑๗ ๑๕

โดย

รศ. ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

ค.๑

เลขหมู่.....

115571

เลขทะเบียน.....

21 ส.ค. 2554

b. 12312447
i.

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าลาดกระบัง ผู้รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี
i.

หัววัดอุณหภูมิด้วยปรากฏการณ์ว่าลานซ์และทันเนลลิงในรอยต่อพีเอ็นและการประยุกต์ใช้งานกับเครื่องวัดคุณสมบัติทางอุณหภูมิ

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาการนำเอาหลักการความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงผลตอบสนองระหว่างแรงดันต่ออุณหภูมิของรอยต่อพีเอ็นและรอยต่อซีเนอร์มาใช้ในการเพิ่มความไวให้กับวงจร PTAT (Proportional To Absolute Temperature) เพื่อใช้เป็นหัววัดอุณหภูมิ การเพิ่มค่าความไวในวงจรนี้สามารถทำได้ด้วยการเพิ่มจำนวนรอยต่อพีเอ็นอนุกรมเพิ่มเข้าไป n รอยต่อและการปรับขนาดแรงดันพังทลายของรอยต่อซีเนอร์ให้มากขึ้น นอกจากนั้นนำไปประยุกต์ใช้งานกับเครื่องวัดคุณสมบัติทางอุณหภูมิ โดยมีหน้าที่เป็นตัววัดค่าอุณหภูมิเพื่อส่งไปควบคุมตัวควบคุมอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ -60°C ถึง 160°C ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงว่าหัววัดอุณหภูมิแบบนี้สามารถทำงานใช้ตรวจจับอุณหภูมิได้อย่างถูกต้องและเป็นเชิงเส้นสูง

Temperature detector by avalanche and tunneling effect of p-n junction and Application for temperature characterization apparatus

Abstract

This project studies the principle of the difference between the temperature dependency of voltage drop across p-n junction diode and breakdown voltage of zener diode to improve the temperature sensitivity of PTAT (Proportional To Absolute Temperature) circuit for temperature sensor device. To increase the sensitivity further, one can add more p-n junction diodes connected in series and use a zener diode with higher breakdown voltage. Then, it is applied for temperature measuring of temperature characterization apparatus in the temperature range -60°C to 160°C . The results show that it gives a high linear and accuracy characteristic temperature sensor.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ทุนสนับสนุนในโครงการนี้ ขอขอบคุณนางสาวพรศิริ คงมาลัย และ นายชลินทร์ สุทธิเนตร นักศึกษาปริญญาโทหลักสูตรวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีส่วนช่วยเหลือเป็นอย่างมาก ขอขอบคุณนักศึกษานิเทศศาสตร์สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง นายโกสินทร์ พงศ์พานิช, นายศรัณยู ธานีโต และนายสายัณต์ คงกระเรียน ที่มีส่วนช่วยเหลือในการสร้าง ทดลอง และทำรูปเล่มรายงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

กิตติกรรมประกาศ

สารบัญ

สารบัญตาราง

สารบัญรูป

บทที่ 1 บทนำ.....1

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ.....	4
2.1.1 คุณสมบัติการขยายตัวของของเหลว (liquid expansion).....	5
2.1.2 คุณสมบัติการขยายตัวของโลหะ (metal expansion and bimetallic strip).....	6
2.1.3 คุณสมบัติของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (electrical resistance).....	7
2.1.3.1 อาร์ทีดี (RTD : Resistance Temperature Detector).....	8
2.1.3.2 เทอร์มิสเตอร์(Thermistor).....	9
2.1.4 คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (Thermoelectricity).....	10
2.1.5 คุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (solid-state).....	14
2.1.5.1 เทอร์โมไดโอด (Thermodiode).....	14
2.1.5.2 เทอร์โมทรานซิสเตอร์ (Thermotransistors).....	15
2.2 โครงสร้างและหลักการพื้นฐานของวงจร PTAT.....	17
2.2.1 การออกแบบวงจรวัดลาร์.....	18
2.2.2 การออกแบบวงจร PTAT.....	20
2.3 โครงสร้างของรอยต่อพี-เอ็นผลอุณหภูมิที่มีต่อรอยต่อพี-เอ็น.....	21
2.3.1 รอยต่อพี-เอ็น ในภาวะสมดุล.....	21
2.3.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้า.....	23
2.3.3 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ.....	27
2.3.4 ผลกระทบจากอุณหภูมิที่มีผลต่อรอยต่อพี-เอ็น.....	30

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการพังทลายแบบซีเนอร์ (effect to junction breakdown).....	32
บทที่ 3 ชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ	
3. กระบวนการสร้างชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ.....	35
3.1 การสร้างชุดกำเนิดอุณหภูมิ.....	35
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์	36
3.1.2 กระบวนการสร้างชุดกำเนิดอุณหภูมิ.....	37
3.2 การสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิ.....	39
3.2.1 อุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบของชุดควบคุมอุณหภูมิ.....	40
3.2.2 กระบวนการสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิ.....	41
3.3 การทดสอบการทำงานของชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ.....	43
3.3.1 ขั้นตอนการทดสอบการทำงานของชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ.....	43
3.3.2 สรุปผลการสร้างชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ.....	44
บทที่ 4 กระบวนการออกแบบวงจร PTAT แบบมีซีเนอร์ไดโอดและการทดสอบผลของ รอยต่อพี-เอ็น รอยต่อซีเนอร์ วงจรตรวจวัดอุณหภูมิในทางปฏิบัติ	
4. หลักการออกแบบวงจร PTAT	46
4.1(ก) การออกแบบวงจร PTAT โดยใช้ผลของรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์...48	
4.1(ข) การออกแบบวงจร PTAT โดยใช้ผลของรอยต่อซีเนอร์และรอยต่อซีเนอร์...49	
4.1.1 การหาความสัมพันธ์ของกระแส I_1, I_2, I_3 และ I_4	51
4.1.2 การคำนวณหาค่าความต้านทาน R_{out} และแหล่งจ่ายแรงดันของ แหล่งจ่ายไฟ V_{CC}	56
4.1.3 หาอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่ออุณหภูมิ.....	58
4.2 การใช้โปรแกรม PSpice ในการออกแบบวงจร PTAT โดยแบบมีซีเนอร์ไดโอด...60	
4.2.1 การสร้างวงจรด้วยและจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice.....	60
4.2.2 การหาความต้านทาน R_{out} , V_{CC} และจุดทำงานของวงจรโดยใช้ โปรแกรมPspice[6].....	61
4.2.3 การวัดผล $\Delta V_{out} / \Delta T$ วงจร โดยใช้โปรแกรม Pspice.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลต่อพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อพี-เอ็นกับซีเนอร์ และ วงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์กับซีเนอร์.....	65
4.3.1 การทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิของพารามิเตอร์ภายในวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อพี-เอ็นกับซีเนอร์ และ วงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์กับซีเนอร์.....	66
4.3.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อแรงดันพังทลาย (V_z) ที่ต่างระดับกันของรอยต่อซีเนอร์โดยใช้โปรแกรม PSpice.....	72
4.3.3 การใช้โปรแกรม PSpice ในการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อแรงดันไปข้างหน้าของรอยต่อพี-เอ็น.....	75
4.3.4 การใช้โปรแกรม PSpice ในการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิต่อแรงดันเอาต์พุตของ วงจร PTAT อนุกรมกับ โหลดความต้านทาน.....	76
4.3.5 การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันพังทลายที่ต่างระดับกันของรอยต่อซีเนอร์โดยการทดสอบจริง.....	78
4.3.6 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อแรงดันไปข้างหน้าของรอยต่อพี-เอ็น โดยใช้ชุดทดสอบคุณสมบัติที่ขึ้นกับอุณหภูมิ.....	80
4.3.7 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อชนิดของตัวต้านทาน โดยใช้ชุดทดสอบคุณสมบัติที่ขึ้นกับอุณหภูมิ.....	81
4.3.8 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ส่งผลต่อวงจร PTAT ที่อนุกรมกับ โหลดความต้านทาน โดยใช้ชุดทดสอบคุณสมบัติที่ขึ้นกับอุณหภูมิ...81	
4.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลของความแตกต่างของรอยต่อพี-เอ็นกับรอยต่อซีเนอร์โดยใช้วงจร PTAT และความแตกต่างของรอยต่อซีเนอร์กับ รอยต่อซีเนอร์ โดยใช้วงจร PTAT	82
4.4.1 การทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิของความแตกต่างระหว่างรอยต่อพี-เอ็นกับรอยต่อซีเนอร์โดยใช้วงจร PTAT และความแตกต่างระหว่างรอยต่อซีเนอร์กับรอยต่อซีเนอร์โดยใช้วงจร PTAT	83

สารบัญ (ต่อ)

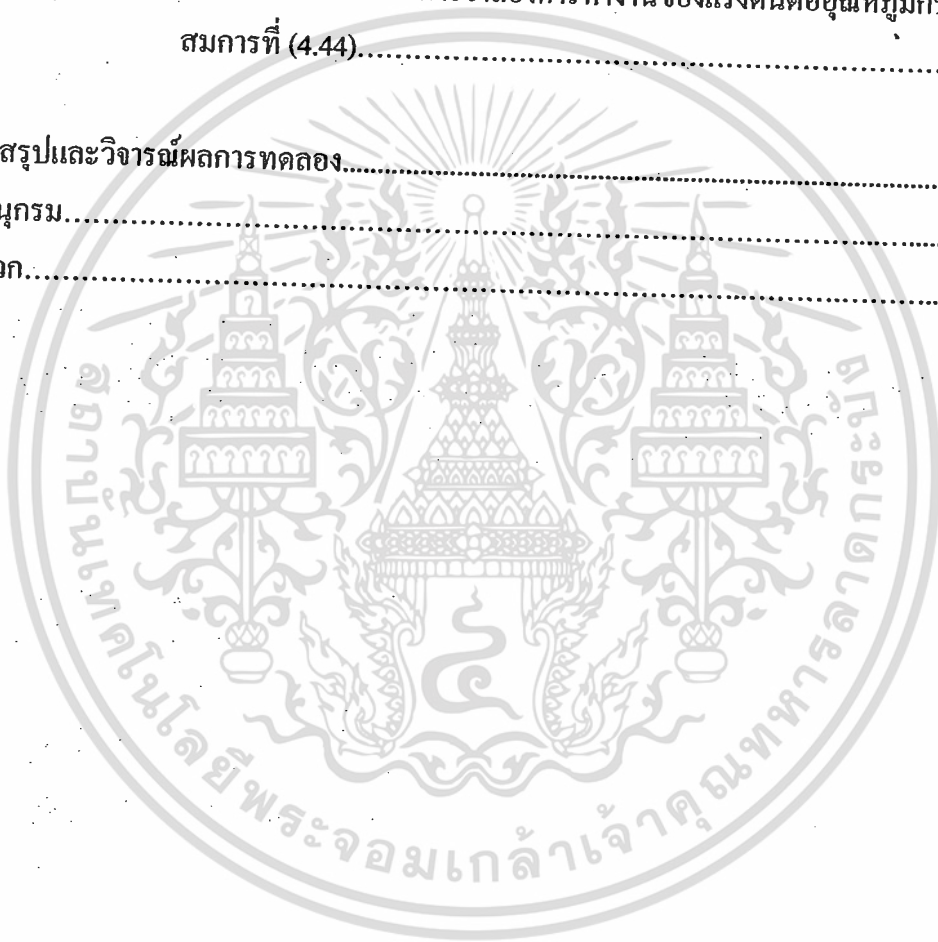
หน้า

4.4.2 การวิเคราะห์ผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของรอยต่อพี-เอ็นกับ รอยต่อซีเนอร์ที่มีต่อวงจร PTAT และรอยต่อซีเนอร์กับรอยต่อซีเนอร์ที่มีต่อ วงจร-PTAT	87
4.4.3 การวิเคราะห์ผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวงจร PTAT แบบรอยต่อพี-เอ็นอนุกรมรอยต่อกับรอยต่อซีเนอร์อนุกรมรอยต่อระหว่าง ผลการจำลองการทำงานและการวัดจริง	88
4.5 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อวงจร PTAT โดยการเพิ่มพื้นที่ของอิมิตเตอร์ เป็น 8 เท่า	94
4.5.1 การทดลองผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อวงจร PTAT โดยการเพิ่มอัตราส่วน ระหว่างพื้นที่ของอิมิตเตอร์เป็น 8 เท่า.....	95
4.5.2 การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อวงจร PTAT โดยการเพิ่มของพื้นที่ อิมิตเตอร์ เป็น 8 เท่าระหว่างผลการจำลองการทำงานและการวัดจริง...96	
4.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง	97
4.6.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการวัดจริงของอัตรา การเปลี่ยนแปลงแรงดันต่ออุณหภูมิของอุปกรณ์แต่ละชนิด.....	97
4.6.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการวัดจริงของอัตรา การเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันเอาต์พุตต่ออุณหภูมิของวงจร PTAT ที่ใช้ รอยต่อซีเนอร์และรอยต่อพี-เอ็น อนุกรม n รอยต่อ กำหนดให้ $n = 1, 2, 3, 4$	99
4.6.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการวัดจริงของอัตรา การเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันเอาต์พุตต่ออุณหภูมิของวงจร PTAT ที่ใช้ รอยต่อซีเนอร์และรอยต่อซีเนอร์ที่ระดับแรงดันพิกัดตั้งแต่ 3.3 V ถึง 4.3 V.....	100
4.6.4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการวัดจริงของอัตรา การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตต่ออุณหภูมิของแต่ละวงจร ในกรณีรอยต่อ ซีเนอร์และรอยต่อพี-เอ็น อนุกรม n รอยต่อกำหนดให้ $n = 1, 2, 3, 4$	102

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6.5 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการวัดจริงของอัตรา การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตต่ออุณหภูมิของแต่ละวงจร ในกรณีรอยต่อ ซีเนอร์และรอยต่อซีเนอร์ที่ระดับแรงดันพียงหลายตั้งแต่ 3.3 V ถึง 4.3 V.....	103
4.6.6 ผลการเปรียบเทียบค่าการจำลองการทำงานของแรงดันต่ออุณหภูมิกับ สมการที่ (4.44).....	104
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	108
บรรณานุกรม.....	110
ภาคผนวก.....	111



สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1.1	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าความต้านทานไฟฟ้า (α) ของวัสดุตัวนำบางชนิด.....	7
1.2	แสดงความไวและย่านการทำงานของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละแบบ.....	12
4.1	สมการความสัมพันธ์เอาท์พุทของเทอร์โมทรานซิสเตอร์โดยใช้โครงสร้างของวงจร PTAT อนุกรมกับความต้านทานเมื่อ $i_{c1} = i_{c2}$ หรือ $I_1 = I_2$	46
4.2	แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของเซนเซอร์อุณหภูมิวัดอุณหภูมิโดยใช้โครงสร้างของวงจร PTAT ก่อนและหลังการนำความสัมพันธ์ของรอยต่อซีเนอร์และพี-เอ็นมาใช้ โดยทั้งนี้กำหนดให้ $I_{C1} = I_{C2}$	51
4.3	สรุปผลการเปรียบเทียบ $\Delta V_Z / \Delta T$ ที่อุณหภูมิ- 60°C ถึง 160 °C ของกราฟรูปที่ 4.27-4.31..	74
4.4	ผลการเปรียบเทียบ $\Delta V_D / \Delta T$ รูปที่ 4.33 ระหว่างอุณหภูมิ- 60°C ถึง 160 °C.....	76
4.5	สรุปผลการเปรียบเทียบ $\Delta V_Z / \Delta T$ ที่อุณหภูมิ- 60°C ถึง 160 °C ของกราฟรูปที่ 4.37.....	79
4.6	สรุปผลการเปรียบเทียบ $\Delta V_D / \Delta T$ ที่อุณหภูมิ- 60°C ถึง 160 °C ของกราฟรูปที่ 4.38.....	80
4.7(ก)	สรุปผลการเปรียบเทียบ $\Delta V_{OUT} / \Delta T$ ที่อุณหภูมิ- 60°C ถึง 160 °C ของวงจรรูปที่ 4.41(ก)- 4.41(ง).....	87
4.7(ข)	สรุปผลการเปรียบเทียบ $\Delta V_{OUT} / \Delta T$ ที่อุณหภูมิ- 60°C ถึง 160 °C ของวงจรรูปที่ 4.41(จ).....	87
4.8	ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการทดสอบจริงของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N5229 ถึง 1N5231.....	97
4.9	ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการทดสอบจริงของรอยต่อพี-เอ็นอนุกรมตั้งแต่ 1 ถึง 4.....	98
4.10	ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการทดสอบจริงวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out}	99
4.11	ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการทดสอบจริงของวงจร PTAT ใช้รอยต่อซีเนอร์และรอยต่อพี-เอ็น อนุกรม n รอยต่อกำหนดให้ $n = 1,2,3,4$ ดังวงจรในรูปที่ 4.41(ก) - 4.41(ง).....	100

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

4.12 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการทดสอบจริงของวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์กับซีเนอร์ ที่ระดับแรงดันตั้งแต่ 3.3V ถึง 4.3V ดังวงจรในรูปที่ 4.41(จ)	102
4.13 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผล การจำลองการทำงานและการทดสอบจริงของวงจร PTAT ของแต่ละวงจร	102
4.14 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการทดสอบจริงของวงจร PTAT ของแต่ละวงจร	102
4.15 ผลการเปรียบเทียบระหว่าง $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากการคำนวณในสมการที่ 4.44 และจากการจำลองการทำงานโดยใช้เงื่อนไขของวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์และรอยต่อพี-เอ็น อนุกรม n รอยต่อกำหนดให้ $n = 1, 2, 3, 4$	105
4.16 ผลการเปรียบเทียบระหว่าง $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากการคำนวณในสมการที่ 4.44 และจากการจำลองการทำงานโดยใช้เงื่อนไขของวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์และรอยต่อซีเนอร์ ระดับแรงดันทั้งหมดตั้งแต่ 3.3 V ถึง 4.3 V	105
4.17 ผลการเปรียบเทียบระหว่าง $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากการคำนวณในสมการที่ 4.44 และจากการวัดจริงโดยใช้เงื่อนไขของรอยต่อซีเนอร์และรอยต่อพี-เอ็น อนุกรม n รอยต่อกำหนดให้ $n = 1, 2, 3, 4$	106
4.18 ผลการเปรียบเทียบระหว่าง $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากการคำนวณในสมการที่ 4.44 และจากการวัดจริงโดยใช้เงื่อนไขของวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์และรอยต่อซีเนอร์ระดับแรงดันทั้งหมดตั้งแต่ 3.3 V ถึง 4.3 V	107

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพเทอร์โมมิเตอร์แบบ liquid-in-glass.....	6
2.2 ภาพแผ่น โลหะคู่ bimetallic strip.....	6
2.3 ลักษณะของ RTD ชนิดต่างๆ.....	9
2.4 ลักษณะของเทอร์มิสเตอร์ชนิดต่างๆ.....	10
2.5 แรงเคลื่อนที่ตกคร่อมวงจรปิด.....	11
2.6 แรงเคลื่อนเทอร์โมคัปเปิลกับอุณหภูมิสำหรับจุดอ้างอิง 0°C โดยให้ความไวและความ ไม่เป็นเชิงเส้นแตกต่างกัน (Curtis D.Johnson 1997:173).....	13
2.7 ลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลชนิดต่างๆ.....	13
2.8 การแปรผันของแรงดันต่ออุณหภูมิของรอยต่อพี-เอ็นแบบฐานรองซิลิคอนกรณีสไปน ไปข้างหน้า ($I = 10\mu\text{A}$).....	15
2.9 1Block Diagram IC LM3911.....	15
2.10 การประยุกต์ใช้เทอร์โมไดโอดเบอร์ LM3911.....	16
2.11 แสดงตัวอย่าง Block Diagram ของ IC เบอร์ AD590.....	17
2.12 แหล่งจ่ายกระแสแบบวิดลาห์.....	18
2.13 ความไม่เป็นอิสระของกระแส I_{C2} ต่อแหล่งจ่ายแรงดันของวงจรวิดลาห์.....	19
2.14 แหล่งจ่ายกระแสแบบ PTAT.....	19
2.15 การหาค่าจุดทำงาน (Operating point).....	20
2.16 ลักษณะแถบพลังงานเมื่อรอยต่ออยู่ในภาวะสมดุล.....	22
2.17 แสดงลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น.....	23
2.18 เปรียบเทียบลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อ (ก)เมื่อไม่ได้รับไบอัส กับ (ข) เมื่อได้รับ แรงดันไบอัส V_A	24
2.19 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า (ก) เมื่ออยู่ในภาวะสมดุลและ (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A	25
2.20 การกระจายความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ (ก) เมื่อไม่ได้รับแรงดันไบอัส (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัส V_A	26
2.21 คุณสมบัติกระแส-แรงดันในอุดมคติของไดโอดรอยต่อ พี-เอ็น.....	27
2.22 เปรียบเทียบลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อ (ก) เมื่อไม่ได้รับไบอัส กับ (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

2.23 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่ออยู่ในภาวะสมดุลกับเมื่อได้รับแรงดันไบอัสไบอัส - V_A	29
2.24 การกระจายความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ (ก)เมื่อไม่ได้รับแรงดันไบอัส (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัส - V_A	29
2.25 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อ n_i ของสารกึ่งตัวนำ GaAs, Si และ Ge.....	31
2.26 ผลการจำลองผลกระทบของอุณหภูมิต่อรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกับดังรูป (a)และไบอัสไปข้างหน้า(b).....	32
2.27 การเกิดปรากฏการณ์การทะลุผ่านกำแพงศักย์(Tunneling).....	34
2.28 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติการพังทลายแบบอะวาลันซ์และแบบซีเนอร์.....	34
3.1 ชุดกำเนิดอุณหภูมิสำหรับทดสอบวงจรตรวจวัดที่อุณหภูมิ $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $160\text{ }^{\circ}\text{C}$	36
3.2 ภาพถ่ายแท่งฮีตเตอร์ที่ใช้งานจริงในการทดสอบ.....	36
3.3 ภาพถ่าย RTD : PT 100 ที่ใช้งานจริงในการทดสอบ.....	37
3.4 ตำแหน่ง PT 100และแท่งฮีตเตอร์ที่ถูกฝังอยู่ในโลหะทองเหลืองขึ้นที่.....	38
3.5 โลหะทองเหลืองทั้ง 2 ชิ้นเมื่อขันน็อตประกบติดกันและใส่พอร์ทซีเรียล.....	38
3.6 ชุดกำเนิดอุณหภูมิที่ประกอบเข้าด้วยกัน.....	39
3.7 ภาพถ่ายลักษณะคิมเมอร์ที่ใช้งานจริงในการทดสอบ.....	40
3.8 ภาพถ่ายอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้งานจริงในการทดสอบ.....	40
3.9 ภาพถ่ายโซลิตสเตรียสที่ใช้งานจริงในการทดสอบ.....	41
3.10 ลักษณะการต่อวงจรชุดควบคุมที่ใช้ในการทดสอบ.....	42
3.11 ภาพถ่ายชุดควบคุมอุณหภูมิที่ประกอบลงกล่องเสร็จแล้ว.....	42
3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันของ PT100 ต่ออุณหภูมิตั้งแต่ $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $160\text{ }^{\circ}\text{C}$	43
4.1 วงจรโครงสร้างเซ็นเซอร์อุณหภูมิ PTAT โดยมีรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์.....	48
4.2 วงจรโครงสร้างเซ็นเซอร์อุณหภูมิ PTAT โดยมีรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์.....	49
4.3 ส่วนของวงจร PTAT ที่ใช้ในการหากระแส I_1 และ I_2	51
4.4 ส่วนของวงจร PTAT ที่ใช้ในการหากระแส I_3 และ I_4	54
4.5 จุดทำงานของวงจร PTAT.....	56
4.6.1 วงจร PTAT ที่มีซีเนอร์และรอยต่อพี-เอ็นอนุกรมกับความต้านทาน R_{out}	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.6.2 วงจร PTAT ที่มีซีเนอร์และรอยต่อซีเนอร์อนุกรมกับความต้านทาน R_{out}	59
4.7 จำลองการทำงานของวงจร PTAT ที่มีซีเนอร์ไดโอดมีค่า $V_z = 5.1\text{ V}$	60
4.8 การปรับแหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} ตั้งแต่ 0-10V โดยใช้โปรแกรม PSpice	61
4.9 จุดทำงานของวงจรที่ 3.6 โดยกระแส $I_3 = I_4 < 20\text{ mA}$	62
4.10 จุดทำงานของวงจรที่ 3.6 โดยกระแส $I_3 = I_4 = 20\text{ mA}$	62
4.11 จำลองการทำงานที่กระแส $I_3 \approx I_4 \approx 20\text{ mA}$	63
4.12 ผลตอบสนองของแรงดัน $\Delta V_{PTAT} / \Delta T$ ต่ออุณหภูมิที่ -60°C ถึง 160°C	63
4.13 ผลตอบสนองของแรงดัน $\Delta V_D / \Delta T$ ต่ออุณหภูมิที่ -60°C ถึง 160°C	64
4.14 ผลตอบสนองของแรงดัน $\Delta V_z / \Delta T$ ต่ออุณหภูมิที่ -60°C ถึง 160°C	64
4.15 ผลตอบสนองของแรงดัน $\Delta V_{out} / \Delta T$ ต่ออุณหภูมิที่ -60°C ถึง 160°C	65
4.16(ก) บล็อกไดอะแกรมและวงจร PTAT ด้วยไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น	66
4.16(ข) บล็อกไดอะแกรมและวงจร PTAT ด้วยไดโอดแบบรอยต่อซีเนอร์	67
4.17 วงจรที่ใช้ทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิของรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์	67
4.18 ภาพถ่ายผลของกระแส $I_3 = 20.2\text{ mA}$, $I_4 = 20.1\text{ mA}$ จากการวัดโดยใช้มัลติมิเตอร์ ของรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์	68
4.19 ภาพถ่ายผลของกระแส $I_3 = 20.6\text{ mA}$, $I_4 = 20.0\text{ mA}$ จากการวัดโดยใช้มัลติมิเตอร์ ของรอยต่อซีเนอร์กับซีเนอร์	68
4.20 ตัวอย่างหัววัดรอยต่อพี-เอ็น เบอร์ 1N4152 และหัววัดรอยต่อซีเนอร์เบอร์ 1N5231	69
4.21 ตัวอย่างหัววัดของรอยต่อพี-เอ็นและหัววัดรอยต่อซีเนอร์ที่พร้อมจะทำการทดลอง	69
4.22 ตัวอย่างตัวต้านทาน R_{out}	70
4.23 วงจร PTATอนุกรมกับความต้านทาน R_{out} ที่ใช้ทดสอบจริง	70
4.24 ตัวอย่างตัวต้านทาน R_{out} ที่พร้อมจะทดสอบ	71
4.25 วงจร PTATอนุกรมกับความต้านทาน R_{out} ที่พร้อมจะทดสอบ	71
4.26 วงจรที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของซีเนอร์ไดโอดโดยใช้โปรแกรม PSpice	72
4.27 ผลตอบสนองของแรงดันต่ออุณหภูมิของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N5226	72
4.28 ผลตอบสนองของแรงดันต่ออุณหภูมิของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N5227	73
4.29 ผลตอบสนองของแรงดันต่ออุณหภูมิของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N5228	73
4.30 ผลตอบสนองของแรงดันต่ออุณหภูมิของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N5229	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.31 ผลตอบสนองของแรงดันต่ออุณหภูมิของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N5231.....	74
4.32 วงจรที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของรอยต่อ พี-เอ็น โดยใช้โปรแกรม Pspice.....	75
4.33 ผลตอบสนองของแรงดันต่ออุณหภูมิของไดโอดเบอร์ 1N4152 ในกรณีที่ $n=1$ ถึง 4.....	75
4.34 วงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out}	77
4.35 ผลของกระแส I_3 และ I_4 ของวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out}	77
4.36 ผลตอบสนองของแรงดันต่ออุณหภูมิของแรงดันเอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 4.34.....	78
4.37 ผลการวัดระดับความแตกต่างของแรงดันฟังก์ทลหลายของซีเนอร์ไดโอดต่ออุณหภูมิ.....	79
4.38 ผลการวัดรอยต่อพี-เอ็น อนุกรม n รอยต่อ โดยกำหนดให้ $n = 1, 2, 3$ และ 4 ต่ออุณหภูมิ....	80
4.39 ผลวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อชนิดของตัวต้านทาน.....	81
4.40 ผลวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out}	82
4.41 วงจรรวมสำหรับทดสอบคุณสมบัติของรอยต่อ พี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์.....	84-85
4.42 วงจรรวมที่ 1 ที่ใช้ในการทดสอบจริง.....	85
4.43 วงจรรวมที่ 2 ที่ใช้ในการทดสอบจริง.....	86
4.44 ภาพถ่ายจริงชุดกำเนิดอุณหภูมิสำหรับวงจรรวม.....	86
4.45 ผลการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมในรูปที่ 4.41(ก)...	88
4.46 ผลการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมในรูปที่ 4.41(ข)...	89
4.47 ผลการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมในรูปที่ 4.41(ค)...	90
4.48 ผลการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมในรูปที่ 4.41(ง)...	90
4.49 ผลการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมในรูปที่ 4.23	
(จ) กรณี $V_{Z2} = 3.3$ V.....	91
4.50 ผลการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมในรูปที่ 4.23	
(จ) กรณี $V_{Z2} = 3.6$ V.....	92
4.51 ผลการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมในรูปที่ 4.23	
(จ) กรณี $V_{Z2} = 3.9$ V.....	92
4.52 ผลการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมในรูปที่ 4.23	
(จ) กรณี $V_{Z2} = 4.3$ V.....	93
4.53 วงจร PTAT โดยเพิ่มขนาดของอิมิตเตอร์ 8 เท่า.....	94
4.54 วงจร PTAT โดยเพิ่มขนาดพื้นที่ของอิมิตเตอร์ 8 เท่าที่พร้อมจะทดสอบจริง.....	95

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.55 ผลการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมในรูปที่ 4.54.....	96
4.56 ผลการเปรียบเทียบการวัดผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ระหว่างรูปที่ 4.41(ก) - 4.41(ง).....	100
4.57 ผลการเปรียบเทียบการวัดผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ของวงจร PTAT ขณะปรับระดับแรงดัน พียงหลายตั้งแต่ 3.3 V ถึง 4.3V ดังวงจรในรูปที่ 4.41(จ).....	101



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันระบบการวัดตลอดจนระบบควบคุมการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม อุปกรณ์หลักที่สำคัญอย่างหนึ่งที่พบโดยทั่วไปคืออุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ (Temperature sensor) ทำหน้าที่ในการเปลี่ยน แปลงอุณหภูมิให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และสามารถพัฒนาในด้านการจัดเก็บข้อมูล ควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ในโรงงานให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยปัจจัยสำคัญของอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิดังกล่าวนี้ จึงทำให้เกิดการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้าง หลักการทำงาน การออกแบบและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพ เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของอุตสาหกรรมที่ขยายตัวมากขึ้นเรื่อยๆ ต่อเทคโนโลยีในปัจจุบัน

ในส่วนของ การวัดและการตรวจจับอุณหภูมิ ปัจจุบันมีอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิอยู่หลายชนิด โดยแต่ละชนิดนั้นจะมีคุณสมบัติ ลักษณะเด่นที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นการนำอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิไปใช้งานจำเป็นต้องพิจารณาคุณสมบัติต่างๆ ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์นั้นเพื่อความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิซึ่งทำขึ้นจากวัสดุโลหะตัวนำต่างกัน 2 ชนิด โดยที่มีปลายด้านหนึ่งถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งเมื่อได้รับอุณหภูมิจะทำให้มีกระแสไหลและทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ปลายอีกด้านหนึ่ง เทอร์โมคัปเปิลจะให้ช่วงการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่กว้างและมีความเป็นเชิงเส้น แต่มีความไวในการตอบสนองต่ออุณหภูมิต่ำ และแรงดันเอาต์พุตที่ค่อนข้างต่ำทำให้มีปัญหาในเรื่องสัญญาณรบกวน

อาร์ทีดี (RTD : Resistance Temperature Detector) เป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิที่สร้างขึ้นจากชั้นฟิล์มบางโลหะด้วยการออกแบบเป็นตัวต้านทานบนฐานรอง (Substrate) โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงสภาพความต้านทาน (Resistivity) ของโลหะที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ RTD จะให้ช่วงการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่กว้างและมีความเป็นเชิงเส้นอย่างมาก โดยมีความไวในการตอบสนองต่ออุณหภูมิปานกลาง แต่ RTD ส่วนใหญ่แล้วมักจะทำจากแพลตตินัม (Platinum) ดังนั้นจึงทำให้มีราคาสูง นอกจากนั้นยังต้องการแหล่งจ่ายที่แม่นยำสูง เพื่อให้การวัดมีความแม่นยำ

เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) เป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิชนิดตัวต้านทานที่ไวต่ออุณหภูมิมาก สามารถสร้างได้ง่าย โดยมักจะทำจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ แต่เทอร์มิสเตอร์ มีการตอบสนองต่ออุณหภูมิไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear) อีกทั้งยังเกิดปัญหาการกำเนิดความร้อนภายในได้ขณะที่ได้รับพลังงานเพียงพอก็เรียกว่า เซฟฮีตติง (Self-Heating) จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานที่ต้องการความละเอียดสูงในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้แล้วยังมีเซ็นเซอร์อุณหภูมิอีกชนิดหนึ่งซึ่งประดิษฐ์ขึ้นมาจากวัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอนรอยต่อ ชนิดเอ็นและพี (N-Type and P-Type) หรือที่เรียกว่า เทอร์โมไดโอด (Thermo Diode) โดยมีข้อดีที่เป็นเซ็นเซอร์อุณหภูมิที่มีความเป็นเชิงเส้น และมีขนาดเล็กจึงทำให้สามารถสร้างตัวอุปกรณ์ให้มีความหนาแน่นสูงในพื้นที่ที่จำกัด ดังนั้นจึงทำให้มีราคาถูก แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องย่านการทำงานแคบ และความต้านทานแฝง (Parasitic Resistance) ซึ่งได้แก่ Trace Resistance และ Bulk Resistance บนฐานรองที่ใช้ทำไดโอด เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการวัดจึงต้องมีวงจรชดเชยความผิดพลาดดังตัวอย่างในลิตทิบิตร สหรัฐอเมริกา US7,281,846 B2

เพราะฉะนั้นจากผลกระทบดังกล่าวนำไปสู่การประดิษฐ์เซ็นเซอร์ที่โครงสร้างพื้นฐานแบบ PTAT (Proportional To Absolute Temperature) โดยมีความเป็นเชิงเส้นสูง ให้ผลตอบแทนความไวต่ออุณหภูมิดีขึ้นและมีย่านการทำงานที่กว้าง

หลักการพื้นฐานของวงจรอุปกรณ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิแบบ PTAT คือ การจัดให้มีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งขนาดของกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสมบูรณ์ (Absolute Temperature) ของชิ้นส่วนอุปกรณ์ในวงจร จึงมีความต้องการวงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น รวมทั้งไม่ให้แหล่งจ่ายเกิดกระแสรั่วไหล (Leakage Current) มีผลต่อกระแสทางด้านเอาต์พุต ดังตัวอย่างการประดิษฐ์แสดงในลิตทิบิตร สหรัฐอเมริกา US4,123,698 ("Integrated circuit two terminal temperature transducer") และ US 5,334,929 ("Circuit for providing a current proportional to absolute temperature") กระแสจากวงจรแหล่งจ่ายกระแส PTAT สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแปลงแรงดันเอาต์พุตที่แปรผันตามอุณหภูมิสำหรับสร้างสัญญาณไฟฟ้าที่แสดงแทนอุณหภูมิ รวมถึงสร้างเซ็นเซอร์อุณหภูมิโดยการนำเสนอ SJFET[1] เพื่อให้มีความไวที่ดีและผลตอบแทนที่เป็นเชิงเส้น

สำหรับ โครงงานนี้ได้ศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิแบบ PTAT โดยการนำความแตกต่างของรอยต่อพี-เอ็นแบบไบอัสไปข้างหน้า (Forward Bias) และ รอยต่อซิลิโคนไดโอดแบบไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias) เพื่อทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตต่ออุณหภูมิ ($\Delta V/\Delta T$) สูง และจากระดับแรงดันเอาต์พุตที่สูง ทำให้ไม่ต้องต่อกับวงจรขยายเหมือนอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิอื่น เช่น เทอร์โมคัปเปิล นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิแบบสามขาได้ ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่าย อีกทั้งยังมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนสามารถสร้างได้โดยใช้เทคโนโลยีกระบวนการสร้างวงจรรวมบนฐานรองซิลิคอนสารกึ่งตัวนำได้จึงทำให้มีขนาดเล็ก สามารถสร้างอุปกรณ์ให้มีความหนาแน่นสูงได้ในพื้นที่ที่จำกัด ดังนั้นจึงทำให้มีราคาถูก

วัตถุประสงค์

1. วิจัยหลักการใหม่ในการวัดอุณหภูมิ
2. เป็นการใช้อองค์ความรู้ทางสิ่งประดิษฐ์ให้เป็นประโยชน์ สร้างนวัตกรรม
3. เป็นการใช้ศักยภาพของอาจารย์ และนักศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ให้เป็นประโยชน์
4. พัฒนาศักยภาพการประดิษฐ์ เผยแพร่ความรู้สู่สังคม และประยุกต์ใช้งาน

ขอบเขตของโครงการ

โครงการนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิโดยใช้วงจร PTAT แบบ โครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ และใช้รอยต่อพี-เอ็นกับรอยต่อซีเนอร์ในการเพิ่มความไวรวม ถึงขยายสัญญาณเอาต์พุตให้กับตัวตรวจวัดอุณหภูมิ โดยเริ่มจากการศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของ วงจร PTAT ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลต่อกระแสและแรงดันที่เป็นผลต่อรอยต่อพี-เอ็น และรอยต่อซีเนอร์ การวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงวงจร PTAT ในขณะที่เพิ่มรอยต่อพี-เอ็นกับ การปรับระดับแรงดันฟังกทลายซีเนอร์ไดโอด อีกทั้งการใช้รอยต่อซีเนอร์กับการปรับระดับแรงดัน ฟังกทลายซีเนอร์ไดโอด เปรียบเทียบผลเอาต์พุตของโครงสร้างของวงจร PTAT พื้นฐานกับวงจร PTAT แบบต่างๆ เช่น การเพิ่มความไวโดยการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของอิมิตเตอร์เป็น 8 เท่า เป็นต้นและนำมาประยุกต์ใช้งานกับเครื่องวัดอุณหภูมิทางอุณหภูมิ

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัยจะกล่าวถึงอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิแบบต่างๆ โครงสร้าง หลักการพื้นฐานของวงจร PTAT โครงสร้างของรอยต่อพี-เอ็น และการพังทลายแบบซีเนอร์ รวมถึงผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีผลต่อรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์ ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการสร้างวงจรตรวจวัดอุณหภูมิแบบ PTAT โดยใช้รอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์

2.1 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

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

การวัดอุณหภูมิโดยทั่วไปมักแสดงระดับของความร้อนหรือเย็นในอุปกรณ์ สารใด ๆ เมื่อเทียบกับระดับอุณหภูมิอ้างอิงซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ได้อ้างไว้ โดยแสดงผลออกมาในหน่วยของการวัดอุณหภูมิซึ่งมีอยู่ 4 หน่วยการวัด คือ

- องศาฟาเรนไฮต์ (Fahrenheit, °F)
- องศาเซลเซียส (Celsius, °C)
- องศาเคลวิน (Kelvin, °K)
- องศาแรนกิน (Rankine, °R)

การตรวจวัดอุณหภูมิ เป็นหลักการวัดพื้นฐานที่มีความสำคัญอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจาก ณ ที่อุณหภูมิมีค่าต่างกัันนั้น อุปกรณ์ สารแต่ละชนิดก็จะมีคุณสมบัติทางกายภาพ ตลอดจนพฤติกรรมที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันออกไป ตัวอย่างเช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารจะเปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิที่กระทำกับสารนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลง ปริมาตรของสารไม่ว่าจะเป็นโลหะ ของเหลว หรือก๊าซ ก็จะมีการขยายตัวเมื่ออุณหภูมิมีค่าเปลี่ยนไป หรือแม้กระทั่งอุณหภูมิภายในร่างกายมนุษย์ หรือสัตว์ที่มีการเปลี่ยนแปลงขณะเจ็บป่วย ไม่สบาย เป็นต้น ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ข้อดีข้อเสีย รวมถึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับอุตสาหกรรมใดได้บ้าง

อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่ใช้กันในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายชนิด ซึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน โดยอาศัยคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้[3]

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

2.1.1 คุณสมบัติการขยายตัวของของเหลว (liquid expansion)

เทอร์โมมิเตอร์แบบนี้จะอาศัยคุณสมบัติการขยายตัวในเชิงปริมาตรของของเหลวเมื่ออุณหภูมิที่มากระทำมีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยปริมาตรของเหลวที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะถูกปรับเทียบเปลี่ยนสเกลออกมาให้อยู่ในรูปหน่วยของอุณหภูมินั้นเอง ทั้งนี้หากเปรียบเทียบกับคุณสมบัติการขยายตัวเชิงปริมาตรในโลหะและก๊าซ เมื่ออุณหภูมิมีค่าเปลี่ยนแปลงไปพบว่าของเหลวจะมีคุณสมบัติในการขยายตัวเชิงปริมาตรได้มากกว่า สามารถสังเกตผลและอ่านค่าได้ชัดเจนกว่าการใช้โลหะหรือก๊าซเป็นสารในการตรวจสอบอุณหภูมิ เช่น เทอร์โมมิเตอร์แบบ liquid-in-glass ซึ่งข้อดีของเทอร์โมมิเตอร์แบบนี้มีข้อดีคือ มีราคาค่อนข้างถูก มีความยืดหยุ่นและใช้งานง่าย แต่มีข้อเสียคือแตกหักได้ง่าย การตอบสนองต่ออุณหภูมิต่ออุณหภูมิค่อนข้างช้า รวมถึงความถูกต้องของการวัดจะขึ้นกับทักษะและประสบการณ์ของผู้ที่ทำการวัดและอ่านค่าเป็นสำคัญ

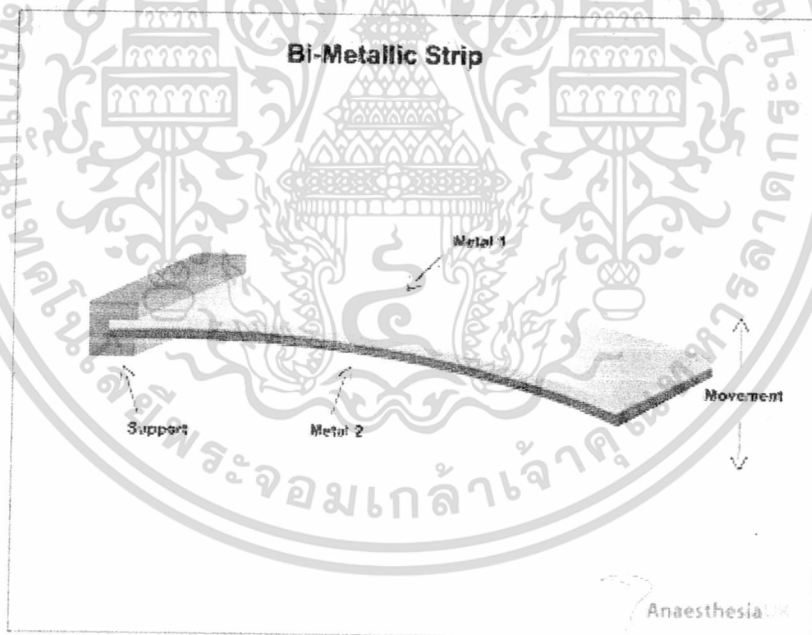
เหมาะสำหรับนำไปใช้งานทางการแพทย์ หรือสัตวแพทย์ เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิของร่างกายมนุษย์หรือสัตว์ ขอบเขตในการตรวจวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมมิเตอร์ปรอททั่วไปอยู่ที่ 238°K ถึง 783°K (หรือประมาณ -35°C ถึง 510°C) และขอบเขตในการตรวจวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมมิเตอร์แอลกอฮอล์ทั่วไปอยู่ที่ 193°K ถึง 343°K (หรือประมาณ -80°C ถึง 70°C) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ภาพเทอร์โมมิเตอร์แบบ liquid-in-glass

2.1.2 คุณสมบัติการขยายตัวของโลหะ (metal expansion and bimetallic strip)

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



รูปที่ 2.2 ภาพแผ่น โลหะคู่ bimetallic strip

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าปลายด้านหนึ่งของแผ่นโลหะคู่ bimetallic strip ถูกยึดอยู่กับที่ และเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของแผ่น โลหะทั้งสองชนิดที่มีค่าต่างกัน ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิรอบข้างมีการเปลี่ยนแปลงจึงทำให้แผ่นโลหะคู่เกิดการ โค้งงอขึ้น เป็นไปตามสัดส่วนของค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป คุณสมบัติของแผ่นโลหะคู่ bimetallic strip

ดังกล่าวข้างต้นเป็นหลักการทำงานพื้นฐานที่สำคัญของเทอร์โมมิเตอร์แบบ bimetallic ข้อดีของ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมมิเตอร์ดังกล่าวคือ มีย่านการทำงานกว้างกว่าแบบเทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทและสามารถนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมได้ ข้อเสียคือ มีผลตอบสนองต่ออุณหภูมิค่อนข้างช้า และต้องทำการสอบเทียบในการวัดผลบ่อยเนื่องจากผลของแผ่นโลหะคู่ bimetallic strip เหมาะสำหรันำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมในกระบวนการผลิต โดยเฉพาะตรวจวัดอุณหภูมิในเตาเผาไฟฟ้า ท่อส่งน้ำร้อน หรือหม้อไอน้ำแรงดันสูง โดยขอบเขตในการตรวจวัดอุณหภูมิแบบทั่วไปของเทอร์โมมิเตอร์แบบ bimetallic อยู่ที่ 238°K ถึง 873°K (หรือประมาณ -35°C ถึง 600°C)

2.1.3 คุณสมบัติของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (electrical resistance)

คุณสมบัติของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุตัวนำใด ๆ จะมีการแปรค่าไปตามผลของอุณหภูมิต่อกัน โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงสามารถเขียนอธิบายได้ด้วยสมการเชิงเส้นดังต่อไปนี้[3]

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

เมื่อ R_0 คือ ค่าความต้านทาน ไฟฟ้าของวัสดุตัวนำที่อุณหภูมิเท่ากับ 0°C มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

R_t คือ ค่าความต้านทาน ไฟฟ้าของวัสดุตัวนำที่อุณหภูมิเท่ากับ T°C มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าความต้านทาน ไฟฟ้าของวัสดุตัวนำ

และ

ΔT คือ $T - T_0$

กรณีที่วัสดุตัวนำต่างชนิดกัน จะมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าความต้านทานไฟฟ้าต่างกัน ดังตารางที่ 1.1 ซึ่งแสดงตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าความต้านทานไฟฟ้า (α) ของวัสดุตัวนำบางชนิด

ตารางที่ 1.1 ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าความต้านทาน ไฟฟ้า (α) ของวัสดุตัวนำบางชนิด [3]

วัสดุตัวนำ	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าความต้านทานไฟฟ้า (α)
ทองแดง	4.3×10^{-3}
เงิน	3.9×10^{-3}
เหล็ก	6.5×10^{-3}
นิกเกิล	6.5×10^{-3}
แพลทินัม	3.9×10^{-3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.1 อาร์ทีดี (RTD : Resistance Temperature Detector)[4]

อาร์ทีดี เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่นำเอาคุณสมบัติพื้นฐานระหว่างความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุตัวนำกับอุณหภูมิรอบข้างมาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งค่าความต้านทานดังกล่าวจะมีค่าเพิ่มตามอุณหภูมิ เรียกว่า “สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงแบบบวก” (Positive Temperature Coefficient ; PTC)

เราพบว่าความนำ(Conductivity ; σ) หรือสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของโลหะใดๆ ในทางกลับกันค่าความต้านทานจำเพาะ (resistivity) ซึ่งเป็นส่วนกลับของความนำ ก็จะเปลี่ยนแปลงแทบจะเป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิในย่านอุณหภูมิห้อง เช่น อะลูมิเนียม ทองแดงและเงิน จะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 0.4% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงค่าความนำของโลหะใดๆ ได้เป็น

$$\sigma = -\rho_c \mu_c \quad (2.2)$$

เมื่อ

ρ_c = ความหนาแน่นของประจุอิเล็กตรอนอิสระมีค่าเป็นลบ

μ_c = ความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอน; m/V.s

โดยเราสามารถสรุปความนำ σ ของโลหะที่ใช้ทำอาร์ทีดีได้ 4 แบบดังนี้

- แพลทินัม เป็นที่นิยมใช้มากที่สุด เขียนบอกไว้เป็น PT ได้แก่ PT-10, PT-100 และ PT-1000 มีความสามารถในการทำซ้ำสูง แต่ความไวต่ำ ราคาแพงมากเมื่อเปรียบเทียบกับนิกเกิลซึ่งมีความสามารถในการทำซ้ำน้อย แต่มีความไวมากกว่า ราคาถูกกว่า
- ทองคำและเงิน ธาตุทั้งสองมีค่าความต้านทานจำเพาะต่ำ
- ทังสแตนมีค่าความต้านทานจำเพาะสัมพัทธ์สูง มักใช้กับการวัดอุณหภูมิที่มีค่าสูง เพราะหากใช้ที่อุณหภูมิปกติจะมีความแปรปรวนและยากต่อการใช้งาน
- นิกเกิล ใช้กับย่านวัดอุณหภูมิสูงๆ มีความเป็นเชิงเส้นต่ำ ทำให้เกิดการ(drift) กับเวลา นอกจากนี้ยังมีวัสดุชนิดอื่นๆที่ใช้ทำอาร์ทีดีได้แก่เหล็กเป็นต้น

และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้จากสมการที่ (2.1) โดยการที่อาร์ทีดีส่วนมากนิยมทำมาจากแพลทินัมทำให้อาร์ทีดีมีลักษณะเด่นคือ มีความเป็นเชิงเส้นสูง พิสูจน์ได้จากสมการที่ (2.1) ย่านการทำงานกว้างและยังสามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูง ส่วนข้อจำกัด คือแพลทินัมมีราคาค่อนข้างแพงเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อวัสดุอื่น เช่น นิกเกิล ทองแดง เป็นต้นทั้งยังให้ผลตอบแทนด้านอุณหภูมิไม่ค่อนมาก ผลตอบแทนซ้ำทางค่าเวลา การนำอาร์ทีดี ไปใช้ส่วนมากจะนำไปประยุกต์ใช้ในงานแบบเทอร์โมมิเตอร์แบบ

electrical resistance พบเห็นได้ในอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตอาหาร เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น อุณหภูมิของเนื้อสัตว์ กระบวนการอุตสาหกรรมทางเคมีเพื่อตรวจวัดและทดสอบอุณหภูมิของน้ำยาเคมี เช่น น้ำยากัดกร่อน สีพื้นรถยนต์ เป็นต้น

โดยขอบเขตในการตรวจวัดอุณหภูมิทั่วไปของอาร์ทีดีแบบแพลทินัม อยู่ที่ 238°K ถึง 873°K (หรือประมาณ -35°C ถึง 600°C)



รูปที่ 2.3 ลักษณะของ RTD ชนิดต่างๆ

2.1.3.2 เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) [4]

เทอร์มิสเตอร์ มาจากคำว่า “Thermally sensitive variable resistor” เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิอีกประเภทหนึ่งที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุกับอุณหภูมิเช่นเดียวกับอาร์ทีดี เทอร์มิสเตอร์ทำจากอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างทองแดงกับโลหะออกไซด์ เช่น แมงกานีส นิกเกิล โคบอลต์ หรือโครเมียม เป็นต้น โดยปกติแล้วค่าความต้านทานทางไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิมียิ่งเพิ่มขึ้น คุณลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่ามี “สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นลบ” (เอ็นทีซี) การเปลี่ยนแปลงนี้จะแปรตามความไม่บริสุทธิ์ในการเจือปน หากเจือปนมากเกินไป สารกึ่งตัวนำจะมีประสิทธิภาพของอุณหภูมิเป็นบวก สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิอยู่ในรูปเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่ออุณหภูมิได้ดังสมการที่ (2.3)

$$R_T = R_0 \exp \beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (2.3)$$

เมื่อ R_T = ความต้านทานเทอร์มิสเตอร์ที่อุณหภูมิ T, Ω

R_0 = ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ที่ 25°C หรืออุณหภูมิอ้างอิงอื่น, Ω

β = ค่าคงที่ของเทอร์มิสเตอร์มีหน่วยเป็นองศาเคลวิน ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาทำ

T = อุณหภูมิ, °K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และด้วยคุณสมบัติของคุณสมบัติดังกล่าวที่มีความไวสูงในการแปรค่าความต้านทานไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนั้น ค่าอุณหภูมิเดียวกันเทอร์มิสเตอร์จึงมีคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าได้มากกว่าเมื่อเทียบกับอาร์ทีดี และมีความเป็นเชิงเส้นไม่ตีเท่าอาร์ทีดี เวลาในการตอบสนองของเทอร์มิสเตอร์ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุและสภาพแวดล้อม เช่น ถ้าบรรจุอยู่ในอ่างน้ำมันผลตอบสนองประมาณ 0.5 วินาที และถ้าเป็นเทอร์มิสเตอร์ตัวเดียวกันที่อยู่ในอากาศอาจจะใช้เวลาในการตอบสนองถึง 10 วินาที และมีความเป็นเชิงเส้นและย่านการทำงานไม่ตีเท่าอาร์ทีดี อีกทั้งยังสามารถเกิดปัญหาการกำเนิดความร้อนภายในได้ในขณะได้รับพลังงานเพียงพอเรียกว่า (self-heating) ซึ่งจะทำให้เทอร์มิสเตอร์มีสภาพความต้านทานสูงขึ้นได้จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานที่ต้องการความละเอียดสูงในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ รูปทรงของเทอร์มิสเตอร์สามารถออกแบบให้มีขนาดเล็กโดยที่ยังคงให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เทอร์มิสเตอร์สามารถนำมาใช้ในบริเวณที่มีพื้นที่แคบได้ ดังนั้นสามารถนำเทอร์มิสเตอร์มาประยุกต์ใช้งานในลักษณะงานทางด้านการแพทย์ การตรวจสอบอุณหภูมิของวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

ขอบเขตในการตรวจวัดอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์มีค่าทั่วไปอยู่ในช่วงประมาณ 173°K ถึง 573°K (-100°C ถึง $+300^{\circ}\text{C}$)



รูปที่ 2.4 ลักษณะของเทอร์มิสเตอร์ชนิดต่างๆ

2.1.4 คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (Thermoelectricity)

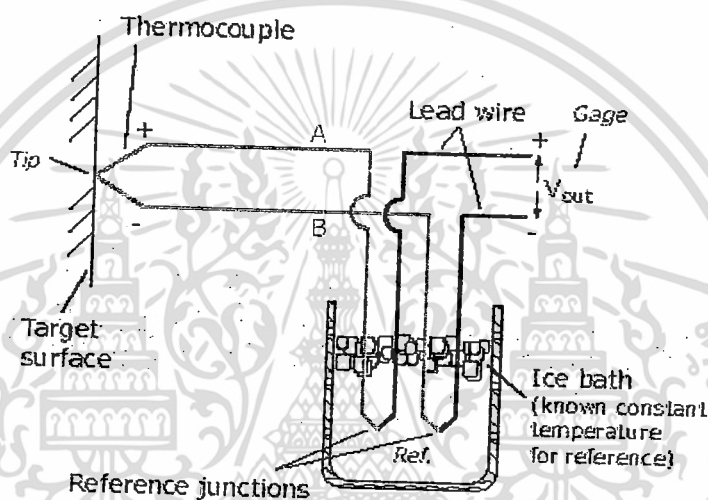
คุณสมบัติของการเปลี่ยนอุณหภูมิเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (thermoelectricity) หมายถึง สัญญาณไฟฟ้าซึ่งกำเนิดโดยพลังงานความร้อน

ปรากฏการณ์ Seeback effect เกิดจากการนำเอาโลหะตัวนำต่างกันสองชนิด เช่น บิสมัท

กับทองแดงนำมาเชื่อมปลายเข้าด้วยกันและให้ความร้อนจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า e.m.f.[4] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปเชิงพาณิชย์หากมีการค้า (electromotive force) ขึ้นที่ปลายอีกด้านหนึ่ง และเรียกแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ว่า “แรงดันไฟฟ้า หรือ ไม่ว่ากรณีใดๆทางสน อักทงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำเนื้อหาไปใช้

See Back voltage ; V_S ” และหลักการของ Seeback effect นี้เองได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิและตั้งชื่อว่า “เทอร์โมคัปเปิล”

เทอร์โมคัปเปิล คือ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (e.m.f.) เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว (แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม) นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองข้างเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยเปิดไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง หากที่จุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิที่ต่างกัน ก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองขึ้นดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แรงเคลื่อนที่ตกคร่อมวงจรปิด

โดยเราสามารถวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้า, ε โดยใช้ทฤษฎีโซลิตสแตตและได้จากการอินทิเกรตอุณหภูมิดังสมการที่ (2.4)

$$\varepsilon = \int_{T_1}^{T_2} (Q_A - Q_B) dT \quad (2.4)$$

ผลที่ได้จากสมการ(2.4) จะพบว่า

- ค่า e.m.f. ที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของอุณหภูมิ จึงเกิดความแตกต่างของค่าคงที่ในการส่งผ่านความร้อนของโลหะ
- ถ้าใช้โลหะชนิดเดียวกันมาทำเทอร์โมคัปเปิลค่า e.m.f.ที่ได้จะเป็นศูนย์และ
- ถ้าอุณหภูมิทั้งสองจุดคือจุดวัดและจุดอ้างอิงเหมือนกับค่า e.m.f.ก็จะเป็นศูนย์

โดยค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลนั้นจะมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิที่จุดอ้างอิง ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการต่อไปนี้

ไม่ว่ากรณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 + fT^5 \quad (2.5)$$

โดย V คือ แรงดันเอาต์พุตของเทอร์โมคัปเปิล มีหน่วยเป็น โวลต์

T คือ อุณหภูมิที่จุดตรวจสอบ

และ a, b, c, d, e, f คือ ค่าคงที่ซึ่งเป็นฟังก์ชันขึ้นกับชนิดของโลหะตัวนำที่นำมาทำเป็นเทอร์โมคัปเปิล

โดยจากการที่เทอร์โมคัปเปิลทำจากธาตุบริสุทธิ์ จะให้ความเป็นเชิงเส้นที่ดี และค่อนข้างมีความเป็นเชิงเส้นสามารถพิสูจน์ได้จากสมการ (2.5) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ค่อนข้างต่ำทำให้เกิดปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวน จากตารางที่ 1.2 แสดงความไวโดยทั่วไปความไวมีค่าน้อยกว่า 100 mV / °C และในรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าในกรณีที่เป็นธาตุบริสุทธิ์จะมีความเป็นเชิงเส้นและย่านการทำงานกว้างเมื่อเปรียบเทียบกับอาร์ทีดีและเทอร์มิสเตอร์ แต่การที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าค่อนข้างต่ำทำให้ต้องปรับสภาพสัญญาณ(signal Conditioning)และยังต้องการวงจรสำหรับชดเชยอุณหภูมิที่รอยต่อทำให้การนำมาใช้งานค่อนข้างยุ่งยากเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิแบบอื่น เทอร์โมคัปเปิลถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการอุตสาหกรรมต่างๆมากมาย ยกตัวอย่าง เช่น ในการตรวจวัดอุณหภูมิในเตาเผา อุตสาหกรรมหลอมเหล็ก หรือแม้กระทั่งในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เป็นต้น

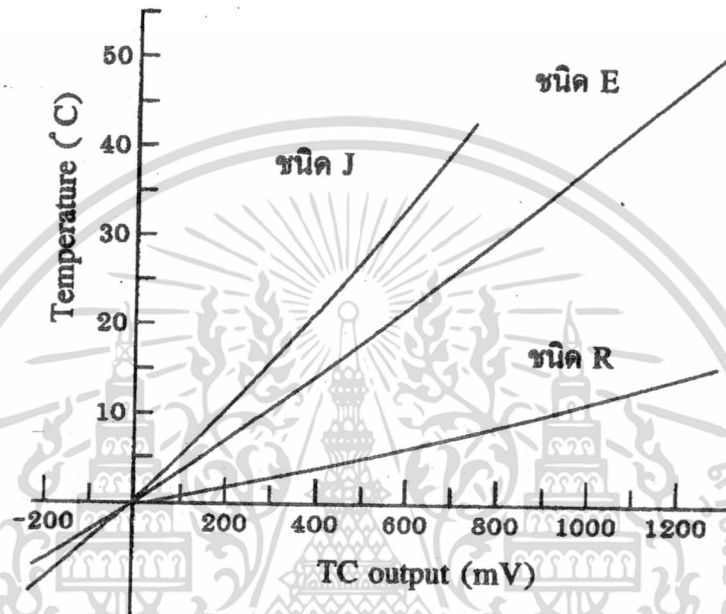
ตารางที่ 1.2 แสดงความไวและย่านการทำงานของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละแบบ[4]

ประเภทของโลหะ	วัสดุเทอร์โมคัปเปิล(ชนิด)	ความไวโดยประมาณ mV/°K	ย่านอุณหภูมิที่ใช้วัด (°K)	ความแน่นอนโดยประมาณ
Base metal	ทองแดง-คอนสแตนแตน(T)	0.05	3-673	±1/2%
Base metal	ทองแดง-คอนสแตนแตน(J)	0.05	63-1473	±1%
Base metal	โครเมิล-อะลูเมิล(K)	0.04	3-1643	±1%
Base metal	โครเมิล-คอนสแตนแตน(E)	0.08	3-1273	±1%
Real metal	แพลทินัม-แพลทินัม/โรเดียม 10%(S)	0.01	223-2033	±1/2%
Real metal	แพลทินัม-แพลทินัม/โรเดียม 13%(R)	0.012	223-2033	±1/2%
Real metal	แพลทินัม-โรเดียม 30%- แพลทินัม/โรเดียม 6%(B)	0.012	223-2033	±1/2%

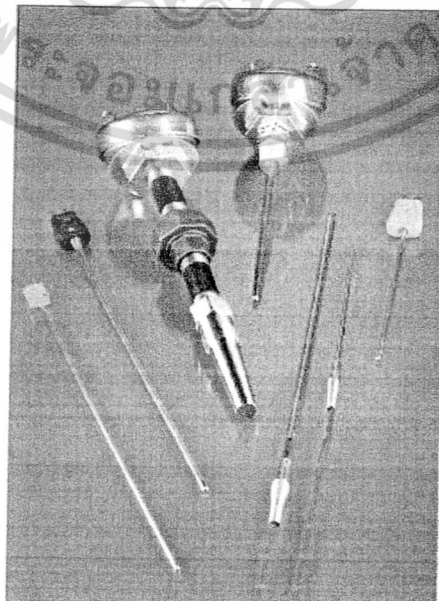
Base metal คือ เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ส่วนผสมของโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสม ทองแดง และนิกเกิล ใช้กับอุณหภูมิถึง 1450 °K โดยปกติและส่วนใหญ่จะถูกใช้ในทางปฏิบัติ ซึ่งจะไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความไวกว่า ถูกกว่า และมีคุณสมบัติใกล้ความเป็นเชิงเส้นสูงกว่า หลักสำคัญที่สุดคือจะต้องกำจัด
 ยานการใช้นานให้ต่ำสุด เพราะว่าโลหะจำพวกนี้จะมีจุดหลอมละลายต่ำ และมีโอกาสการ
 เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย

Rare metal คือ เทอร์โมคัปเปิลใช้ส่วนผสมของโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสมของ
 แพลทินัม ใช้กับอุณหภูมิได้สูงถึง 2000 °K หากเป็นส่วนผสมของทั้งสแตน โรเดียม และ โมลิบดีนัม
 ใช้สำหรับอุณหภูมิถึง 2900 °K



รูปที่ 2.6 แรงเคลื่อนเทอร์โมคัปเปิลกับอุณหภูมิสำหรับจุดอ้างอิง 0 °C โดยให้ความไวและความไม่
 เป็นเชิงเส้นแตกต่างกัน (Curtis D.Johnson 1997:173)[4]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.7 ลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลชนิดต่างๆ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 คุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (solid-state)

จากคุณสมบัติในการทำงานของเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิทั้งสามชนิด คือ เทอร์มิสเตอร์ อาร์ทีดี และเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วไปนั้น จะพบว่าผลตอบสนองของเทอร์มิสเตอร์มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงและมีย่านการวัดแคบ ในขณะที่อาร์ทีดีจะมีผลตอบสนองที่มีความเป็นเชิงเส้นแต่ยังคงมีขนาดของสัญญาณเอาต์พุตเล็กมาก ส่วนเทอร์โมคัปเปิลจะให้ผลตอบสนองค่อนข้างไม่ค่อยเป็นเชิงเส้น มีย่านการวัดกว้าง แต่สัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีขนาดเล็กมาก ทั้งยังต้องการจุดอ้างอิงอุณหภูมิในการวัดอีกด้วย ด้วยปัจจัยสำคัญที่เป็นข้อจำกัดในการใช้งานของเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิทั้งสามชนิดข้างต้น จึงได้มีการพัฒนานำเอาคุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมาทำในรูปแบบของวงจรรวม (integrated circuit ; IC) เพื่อใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ เช่น LM3911, LM335 , LM34 ,AD590 เป็นต้น

2.1.5.1 เทอร์โมไดโอด (Thermodiode)[2]

เทอร์โมไดโอด เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่นำเอาวัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอนรอยต่อชนิดเอ็นและชนิดพี (N-type and P-type) มาใช้ โดยอาศัยหลักการความสัมพันธ์ของไดโอดระหว่างแรงดันกับกระแสที่มีผลต่ออุณหภูมิดังสมการที่ (2.6)

$$V = T \left(\frac{k}{q} \right) \ln(I/I_s + 1) \quad (2.6)$$

เมื่อ I_s = กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ
 V = แรงดัน ไบอัสข้างหน้า (Forward bias)
 k = Boltzman's constant

กำหนดให้กระแส $\frac{I}{I_s} \gg 1$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.6) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

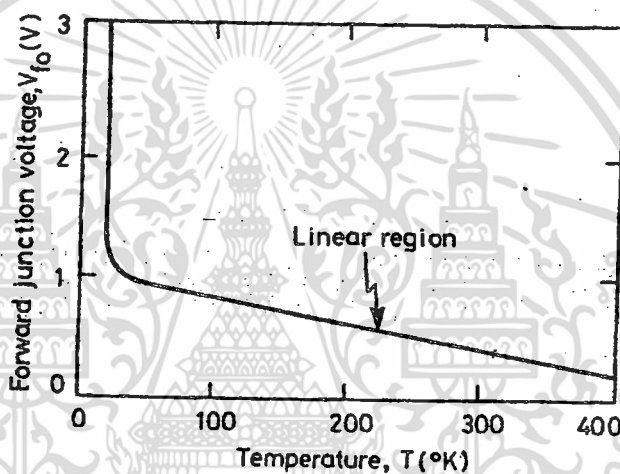
$$V = T \left(\frac{k}{q} \right) \ln(I/I_s) \quad (2.7)$$

โดยทั่วไปแล้วกระแส I_s มีผลน้อยมากในกรณีที่ไดโอดทำงานในย่าน ไบอัสข้างหน้า ทำให้สมการที่ (2.7) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$V = T \left(\frac{k}{q} \right) \ln(I) \quad (2.8)$$

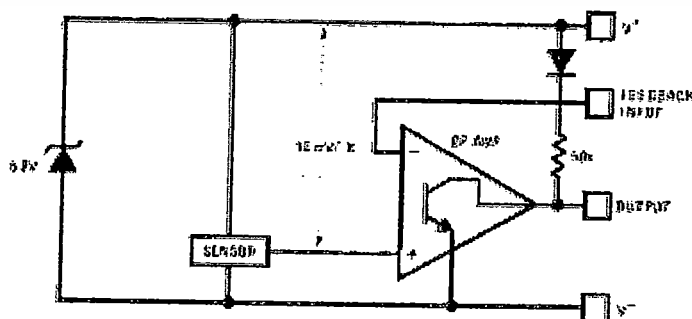
เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับ และจากรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นการวัดผลของซิลิคอนไดโอด โดยกำหนดกระแสไบอัสไปข้างหน้าเริ่มต้นที่ $10\mu A$ จากการกราฟค่าแรงดันเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง และเริ่ม

วัดผลได้ตั้งแต่ 50 °K ถึง 300 °K (-233 ถึง 27 °C) แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอยู่ประมาณที่ -20mV/°C และมีความเป็นเชิงเส้น สามารถหาความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิได้ดังสมการที่ (2.7) โดยแรงดันตกคร่อมไดโอดโดยทั่วไปอยู่ที่ 0.7 V ที่อุณหภูมิ 25 °C และ 0.25V สำหรับ germanium จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเทอร์โมไดโอดที่ทำจากซิลิคอน อุณหภูมิเริ่มแรกแรงดันตกคร่อมไดโอดในกรณีที่ย้ายกระแสไปข้างหน้า ไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากความผิดพลาดจากคุณลักษณะเฉพาะของซิลิคอนเมื่อนำมาทำไดโอด อันเกิดจากการไม่ ionized ของอะตอมในขณะอุณหภูมิต่ำ และในทางกลับกันถ้าใช้ในอุณหภูมิสูงที่มากกว่า 200°C ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอะตอมอย่างมากส่งผลให้รอยต่อเกิดการเสียหายเป็นผลให้ซิลิคอนถูกจำกัดในย่านการทำงานที่ค่อนข้างแคบ



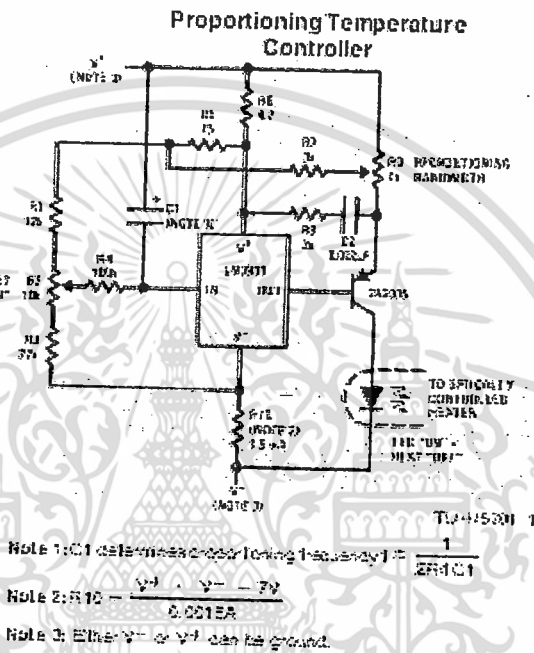
รูปที่ 2.8 การแปรผันของแรงดันต่ออุณหภูมิของรอยต่อพี-เอ็นแบบฐานรองซิลิคอนกรณีไบอัสไปข้างหน้า ($I = 10\mu A$) [2]

รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่าง Block Diagram ของ IC เบอร์ LM3911 ของบริษัท National Semiconductor ซึ่งภายในบรรจุวงจรออปแอมป์ สำหรับชดเชยความถี่เพื่อทำให้เกิดความแม่นยำในการวัด โดยให้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอยู่ที่ 20mV/°C ใช้อุณหภูมิช่วงอุณหภูมิประมาณ -25 °C ถึง 85 °C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.9 Block Diagram IC LM3911
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และด้วยคุณสมบัติดังกล่าวทำให้เทอร์โมไดโอด มีความไวสูง มีความเป็นเชิงเส้น ทั้งยังมีขนาดเล็ก ซึ่งสามารถนำมาใช้งานในพื้นที่จำกัดได้ อีกทั้งยังราคาถูกเนื่องจากต้นทุนต่ำ แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่ย่านการทำงานแคบ และหากต้องการความแม่นยำในการวัด ต้องออกแบบชดเชยความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ทำให้วงจรที่นำมาใช้มีความซับซ้อนดังรูปที่ 2.10 เทอร์โมไดโอดถูกนำไปใช้ในการติดตั้งกับบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องใช้เนื้อที่จำกัด และนำมาพัฒนาเพื่อให้มีความหลากหลายในการใช้งาน



รูปที่ 2.10 การประยุกต์ใช้เทอร์โมไดโอดเบอร์ LM3911

2.1.5.2 เทอร์โมทรานซิสเตอร์ (Thermotransistors)[2]

เทอร์โมทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่น่ามาเป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิ เนื่องจากเป็นวงจรรีเลย์ทรานซิสเตอร์อย่างง่าย ซึ่งแรงดันตกคร่อมระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ (V_{be}) จะขึ้นตรงต่ออุณหภูมิเหมือนความสัมพันธ์ของไดโอด

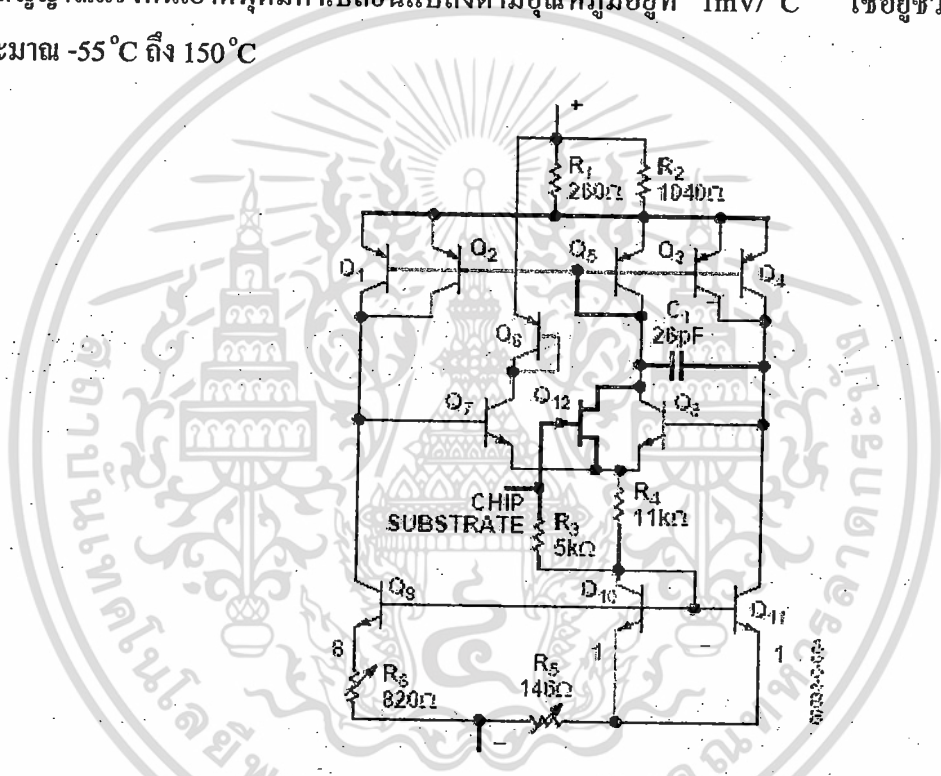
ดังนั้นหากเรานำหลักการนี้มาประยุกต์เป็นเครื่องมือในการวัดอุณหภูมิซึ่งกำหนดให้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ตัวหนึ่งมีกระแส collector i_{c1} และให้ทรานซิสเตอร์ตัวที่สองมีค่ากระแส collector i_{c2} โดยกำหนดให้ $i_{c1} \ll i_{c2}$ ซึ่งความแตกต่างของแรงดัน ΔV_{be} ภายใต้การควบคุมของกระแส collector ทำให้เรานำมาเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.9)

$$\Delta V_{be} = (V_{be1} - V_{be2}) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{i_{c1}}{i_{c2}} \right) \text{ เมื่อ } i_{c1} \ll i_{c2} \quad (2.9)$$

ซึ่งโครงสร้างของวงจร PTAT เหมือนกับเทอร์โมไดโอด ที่เอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ (Proportional To Absolute Temperature) ดังนั้น โครงสร้างของวงจร PTAT จึงนำมาประยุกต์ใช้เป็นเทอร์โมทรานซิสเตอร์

และด้วยคุณสมบัติในสมการที่ 2.9 ทำให้เทอร์โมทรานซิสเตอร์มีความเป็นเชิงเส้นสูง และให้ผลตอบสนองเร็ว และมีย่านการทำงานที่กว้างกว่าเทอร์โมไดโอด แต่การออกแบบมีความซับซ้อน และให้สัญญาณเอาต์พุตที่มีขนาดเล็ก

รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่าง Block Diagram ของ IC เบอร์ AD590 ของบริษัท Analog Device ซึ่งใช้โครงสร้างของวงจร PTAT เป็นหลักดังจะกล่าวในหัวข้อที่ 2.2 โดย IC เบอร์ AD590 ให้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอยู่ที่ $1\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ ใช้อุณหภูมิประมาณ -55°C ถึง 150°C

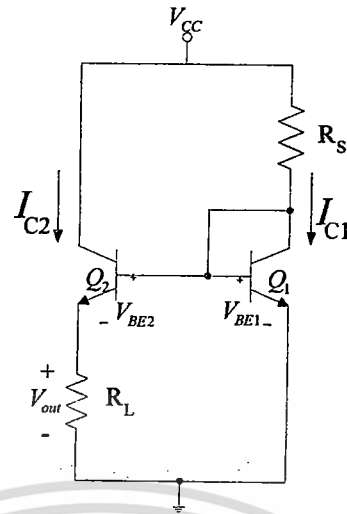


รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่าง Block Diagram ของ IC เบอร์ AD590

2.4 โครงสร้างและหลักการพื้นฐานของวงจร PTAT

ก่อนที่จะเข้าใจถึงหลักการพื้นฐานของแหล่งจ่ายกระแสแบบ PTAT ควรเข้าใจถึงหลักการพื้นฐานของวงจรแหล่งจ่ายกระแสแบบวิดลาร์ (Widlar current source) ก่อน

วงจรวิดลาร์ดัดแปลงมาจากวงจรแหล่งจ่ายกระแสอย่างง่าย (Current source) [8] โดยกำหนดให้ Q_1 และ Q_2 มีค่าแรงดันคั่นคร่อมเบส-อิมิสเตอร์ V_{BE} ต่างกัน โดยการต่อค่าความต้านทานอนุกรมที่ขาอิมิสเตอร์ของ Q_2 ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แหล่งจ่ายกระแสแบบวิดลาร์

2.2.1 การออกแบบวงจรวิดลาร์

กำหนดให้ $I_{C1} \approx 0$ ทำให้ Q_1 ส่งผลในย่านไบอัสไปข้างหน้า (Forward Bias) จากรูปที่ 2.12 Q_1 ต่อแบบรอยต่อไดโอด (diode connected) และกำหนดให้ Q_2 ทำงานในย่านไบอัสไปข้างหน้าด้วยเช่นกัน ทำให้ผู้ออกแบบสามารถใช้กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's Voltage Law : KVL) [21] รอบรอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ (base-emitter junction) ของ Q_1 และ Q_2 ได้ดังสมการที่ 2.9

$$V_{BE1} - V_{BE2} - I_{C2}R_L = 0 \quad (2.10)$$

ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ $\beta_F \rightarrow \infty$, $V_A \rightarrow \infty$ และ $V_{CC} \gg V_{BE(on)}$ เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบ

จากสมการ 2.10 สามารถนำความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไดโอดในสมการที่ 2.7 มาใช้โดยกำหนดให้กระแสคอลเลกเตอร์ (collector current ; I_C) มีค่าเช่นเดียวกันกระแสที่ไหลผ่านไดโอด I และกำหนดให้ $V_T = kT/q$

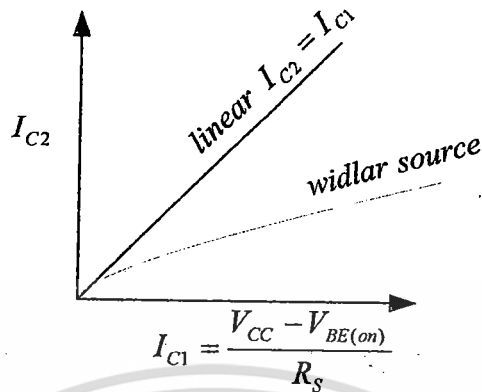
$$V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_{S1}} - V_T \ln \frac{I_{C2}}{I_{S2}} - I_{C2}R_L = 0 \quad (2.11)$$

เนื่องจาก Q_1 และ Q_2 เป็นเบอร์เดียวกันดังนั้น $I_{S1} = I_{S2}$

$$V_T \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}} = I_{C2}R_L \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

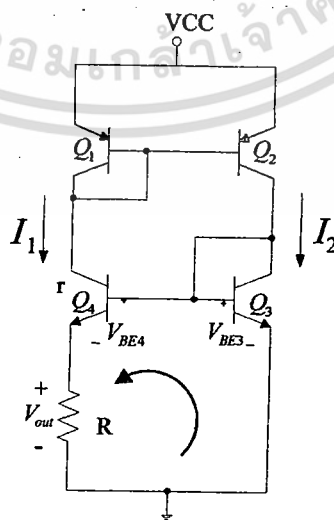
โดยที่ $I_{C1} = \frac{V_{CC} - V_{BE1}}{R_S}$



รูปที่ 2.13 ความไม่เป็นอิสระของกระแส I_{C2} ต่อแหล่งจ่ายแรงดันของวงจรวิดลาร์

จากสมการ (2.12) พบว่ากระแส I_{C1} สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามแหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} ที่จ่ายให้แก่วงจร ส่งผลให้ค่ากระแส I_{C2} เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงทำให้วงจรแบบนี้ ไม่เหมาะที่จะใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแส (current source) ให้กับวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ

ในการนำวงจรวิดลาร์นั้นกระแส I_{C2} ต้องมีค่าน้อยกว่า I_{C1} เสมอจึงทำให้สมการเป็นจริงเสมอ(วงจร current source อย่างง่าย $I_{C1} = I_{C2}$ เสมอ ดังรูปที่ 2.13) ส่วนข้อดีของวงจรวิดลาร์สามารถใช้งานที่ค่า V_{CC} มีค่าน้อยกว่าแบบวงจรแหล่งจ่ายกระแสอย่างง่าย (simple current source) และค่าความต้านทานที่ใช้ในวงจรมีค่าน้อยเทียบกับวงจรแหล่งจ่ายกระแสอย่างง่าย ด้วยข้อจำกัดของวงจรวิดลาร์ที่อัตราส่วนของกระแสเปลี่ยนแปลงตามแหล่งจ่ายแรงดันทำให้นักวิจัยได้นำเสนอวงจร PTAT (Proportional to absolute temperature) ขึ้นมา[7] ดังรูปที่ 2.14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.14 แหล่งจ่ายกระแสแบบ PTAT
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การออกแบบวงจร PTAT

จากรูปที่ 2.14 กำหนดให้กระแส I_1 มีค่าเท่ากับ I_2 เนื่องจากแหล่งจ่ายกระแสที่สร้างจาก Q_1 และ Q_2 มีพื้นที่ที่เท่ากัน ส่งผลให้กระแสคอลเลคเตอร์ (collector) ของ Q_3 มีค่าเท่ากับกระแสคอลเลคเตอร์ของ Q_4 จากรูปที่ 2.14 Q_4 มีพื้นที่บริเวณขาอิมิตเตอร์ (emitter) มากกว่า Q_3 อยู่ r เท่า ส่งผลให้ค่า I_{S4} ของ Q_4 มีค่ามากกว่า I_{S3} ของ Q_3 อยู่ r เท่าด้วย โดยสมการ V_{out} สามารถหาได้โดยการ KVL

$$V_{BE3} - V_{BE4} - V_{out} = 0 \quad (2.13)$$

$$V_{out} = I_1 R \quad (2.14)$$

นำความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.13 และ 2.14 มาจัดให้อยู่ในรูปของกระแส I_1 และ I_2 โดย V_{BE3} และ V_{BE4} นำมาจากความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.7 ได้ดังนี้

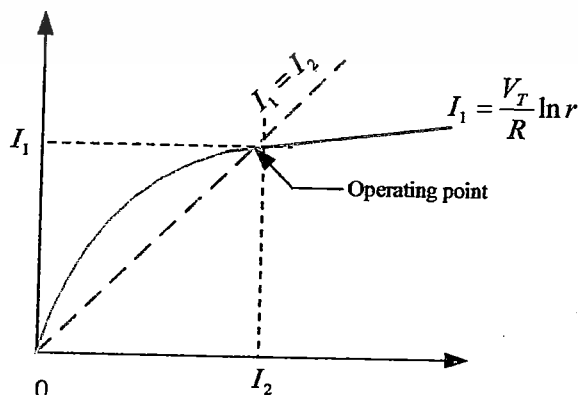
$$V_T \ln \frac{I_2}{I_{S3}} - V_T \ln \frac{I_1}{I_{S4}} = I_1 R$$

$$V_{out} = V_T \ln \frac{I_2 I_{S4}}{I_{S3} I_1} \quad (2.15)$$

กำหนดให้ $I_{S4} = r I_{S3}$ และ $I_2 = I_1$
 ดังนั้น V_{out} ที่ตกคร่อม R มีค่า

$$V_{out} = V_T \ln(r) \quad (2.16)$$

และค่ากระแส I_1 มีค่าเท่ากับ $(V_T \ln r) / R$ และจากสมการ (2.16) สรุปได้ว่า V_{out} ของวงจร PTAT แปรตามอุณหภูมิเป็นเชิงเส้น [14]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

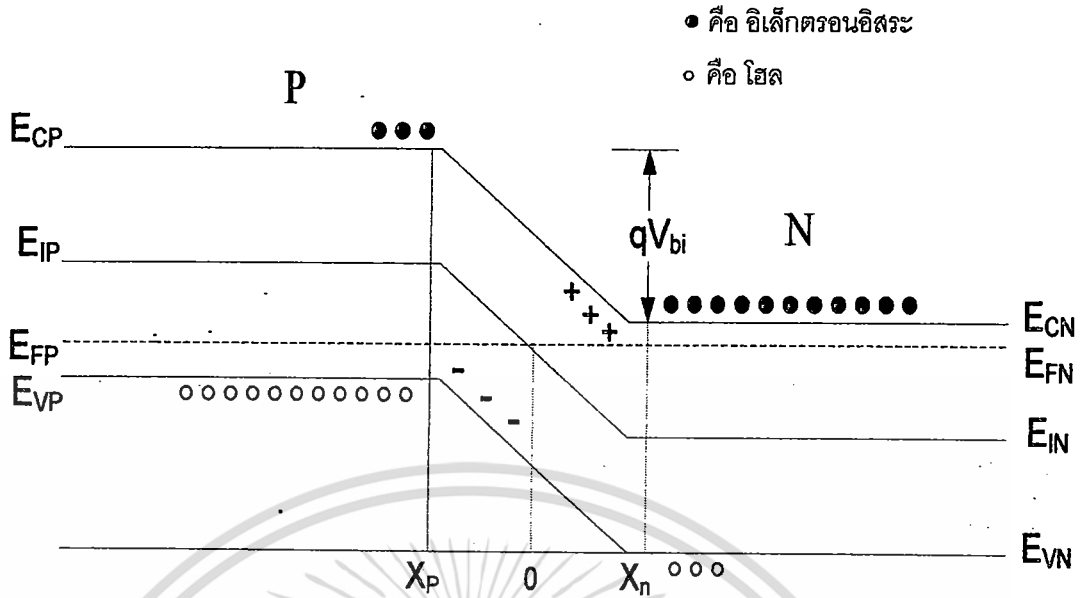
ในการออกแบบวงจรแหล่งจ่ายกระแสโดยใช้หลักการของ self bias เพื่อลดผลของค่ากระแสกับการเปลี่ยนแปลงค่าของ V_{CC} โดยใช้วงจรสะท้อนกระแสแทนที่ตัวต้านทานต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันเหมือนวงจรวิดลาร์ ซึ่งวิธีการนี้จะมีการป้อนกลับของกระแส ทำให้การตอบสนองต่อแหล่งจ่ายแรงดันมีค่าน้อย การทำงานของวงจรจะขึ้นอยู่กับกระแส I_2 และ I_1 และให้วงจรสะท้อนกระแสมีค่าอัตรากระแสสะท้อนกระแสเท่ากับหนึ่ง จากกราฟความสัมพันธ์ของ I_2 และ I_1 มีจุดตัดเกิดขึ้น 2 จุด ซึ่งจุดทำงานของวงจรเป็นจุดที่ต้องนำมาใช้งานในการออกแบบ ส่วนจุด(0,0) นั้นเป็นจุดที่ไม่ต้องการนำมาใช้งานเนื่องจากกระแส I_2 และ I_1 มีค่าเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.15

2.3 โครงสร้างของรอยต่อพี-เอ็นผลอุณหภูมิที่มีต่อรอยต่อพี-เอ็น

วิธีการหนึ่งในการนำสารกึ่งตัวนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสามารถทำได้โดยการเติมอะตอมสารเจือ (impurity atoms) ลงไป เพื่อทำให้เกิดเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ชนิดพีและชนิดเอ็น จากนั้นจึงนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่าอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor devices) โครงสร้างง่ายที่สุดในการนำมาสร้างคือ โครงสร้างของรอยต่อ พี-เอ็น (p-n junction) ซึ่งนำมาพัฒนาเป็นไดโอดชนิดต่างๆ [5] เป็นต้น

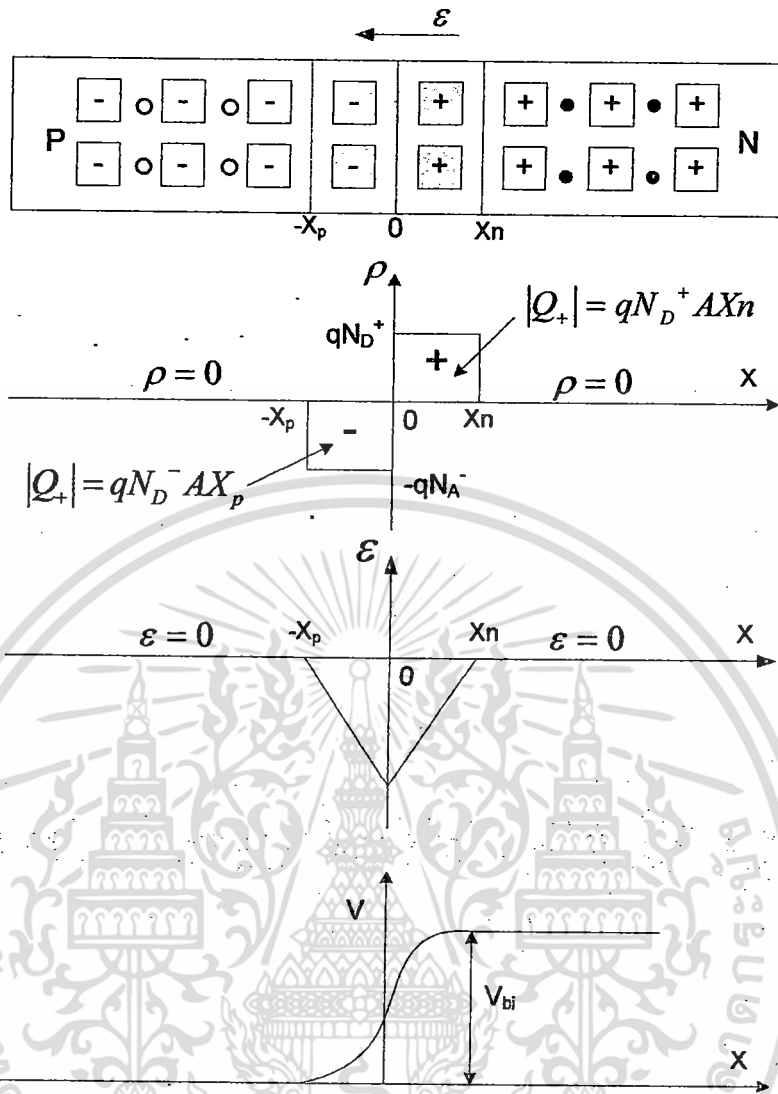
2.3.1 รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล

ในเบื้องต้นนี้จะเริ่มพิจารณาถึงรอยต่อพี-เอ็นชนิดขั้นบันได (step junction) เป็นโครงสร้างที่ง่ายที่สุดในการทำความเข้าใจ เนื่องจากความหนาแน่นประจุพาหะของด้านทั้งสองของรอยต่อพี-เอ็นมีค่าไม่เท่ากัน จึงเกิดการแพร่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะ เพื่อให้ด้านทั้งสองมีความหนาแน่นประจุพาหะเท่ากัน โดยอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นจะแพร่ข้ามไปยังด้านพีและโฮลทางด้านพีก็จะแพร่ข้ามไปยังด้านเอ็นพิจารณาได้จากลักษณะแถบพลังงาน ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ลักษณะแถบพลังงานเมื่อรอยต่ออยู่ในภาวะสมดุล[5]

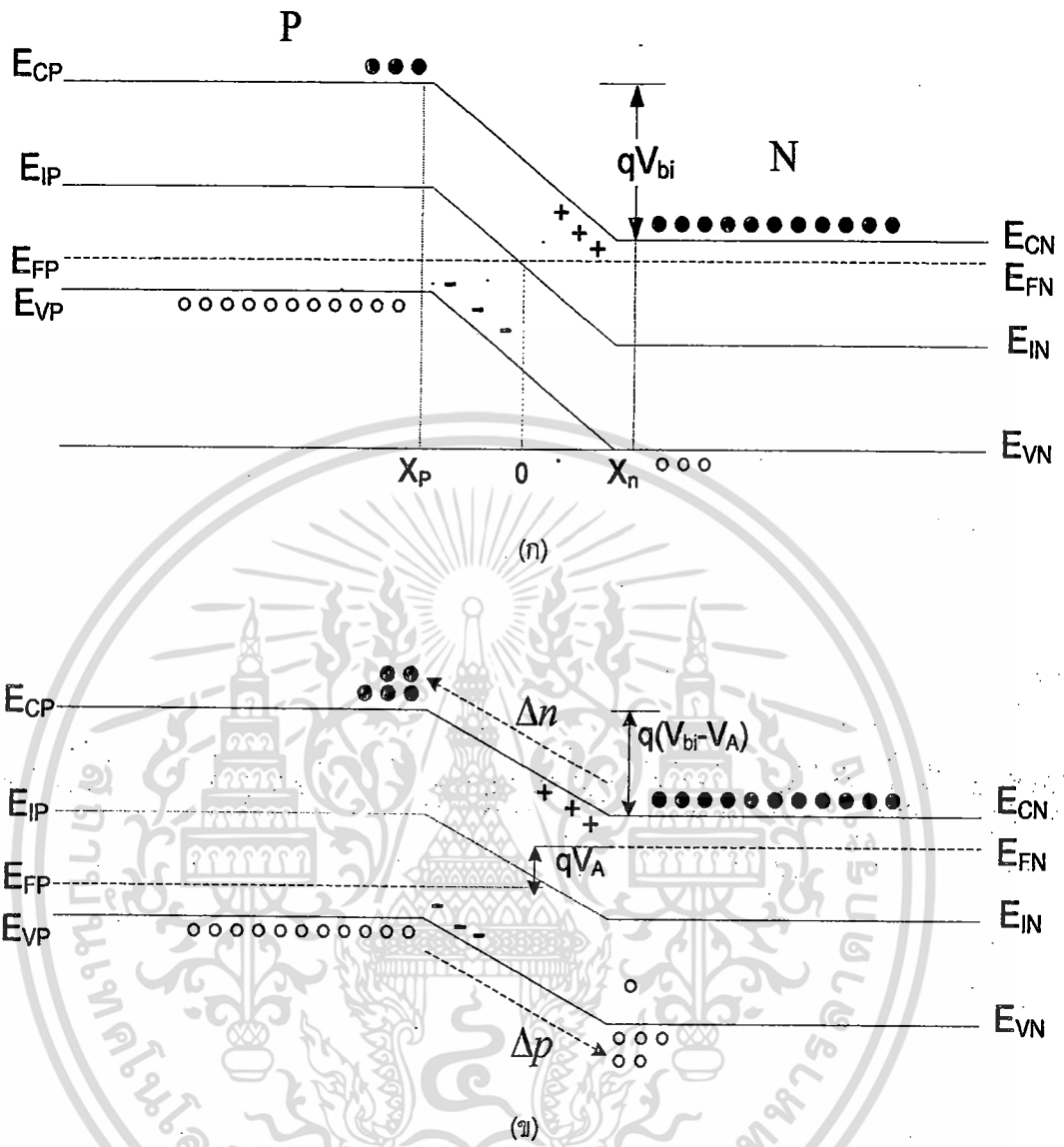
เมื่อเกิดการแพร่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะจะทำให้เกิดการรวมตัว (recombination) ระหว่างอิเล็กตรอน-โฮล และทำให้อะตอมสารเจือผู้ให้ทางด้านเอ็นที่บริเวณรอยต่อมีสภาพเป็นไอออนบวก ส่วนอะตอมสารเจือผู้รับทางด้านพีมีสภาพเป็นไอออนลบ ซึ่งประจุไฟฟ้าดังกล่าวทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นบริเวณรอยต่อและเกิดการสะสมประจุไฟฟ้าขึ้นบริเวณรอยต่อ โดยอำนาจของสนามไฟฟ้าจะต่อต้านการเคลื่อนที่ของประจุพาหะส่วนมากในการข้ามรอยต่อจนในที่สุดการแพร่ข้ามรอยต่อดำเนินไปจนถึงภาวะสมดุล (equilibrium) นั่นคือ กระแสการแพร่มีค่าเท่ากับกระแสดริฟท์ ทำให้บริเวณรอยต่อนั้นแทบจะไม่มีพาหะอยู่เลย เนื่องจากถูกอิทธิพลของสนามไฟฟ้าพัดพาออกไป จึงเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณปลอดพาหะ (depletion region) และการที่มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อแสดงว่ามีความต่างศักย์ทำให้เกิดแรงดันภายในขึ้น (built in voltage) ระหว่างด้านพีและด้านเอ็น หรืออาจเรียกว่า ศักย์สัมผัส (contact potential) ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น[5]

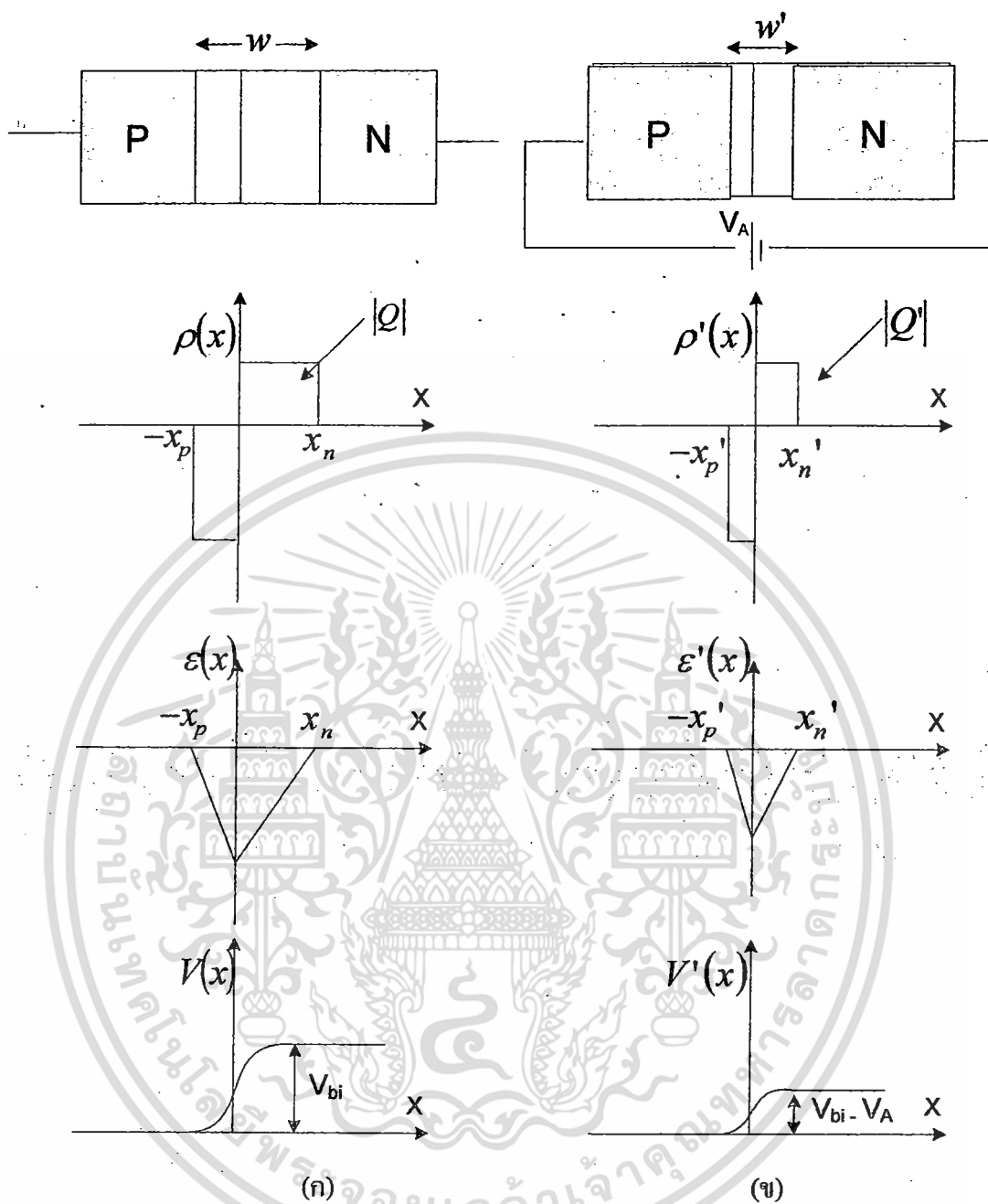
2.3.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้า

การให้แรงดันไบอัสไปข้างหน้า (forward bias : V_A) ทำได้โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าที่ด้านพีเป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านเอ็น โดยการกำหนดให้ความต้านทานในส่วนของเนื้อสารกึ่งตัวนำมีค่าน้อยมาก จึงพิจารณาได้ว่าไม่มีแรงดันตกคร่อมในส่วนของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นแรงดัน V_A ทั้งหมดจะไปปรากฏที่รอยต่อพี-เอ็นและมีทิศทางตรงข้ามกับศักย์ภายในรอยต่อจึงเกิดการหักล้างของแรงดัน กำแพงศักย์จะมีค่าลดลงเป็น $(V_{bi} - V_A)$ ทำให้สนามไฟฟ้าภายในรอยต่อมีขนาดลดลง จึงเกิดการแพร่ของประจุพาหะได้มากขึ้น โดยโฮลทางด้านพีจะแพร่ไปยังด้านเอ็นและอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นจะแพร่ไปด้านพีและกลายเป็นพาหะส่วนน้อย ระดับพลังงานเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อจะแตกต่างกัน qV_A ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.18



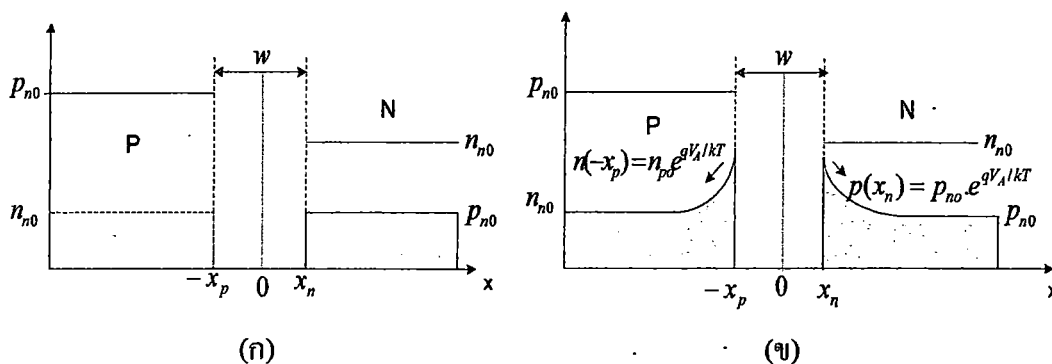
รูปที่ 2.18 เปรียบเทียบลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อ (ก)เมื่อไม่ได้รับไบอัส กับ (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัส V_A [5]

เมื่อเกิดการแพร่ของประจุพาหะก็จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร เรียกว่า กระแสไบอัสตรง และการที่สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อลดลงจะทำให้ขนาดความกว้างบริเวณปลอดพาหะลดลง หรือก็คือการลดลงของประจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อนั่นเอง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า (ก) เมื่ออยู่ในภาวะสมดุล และ(ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A [5]

ส่วนการเพิ่มขึ้นของพาหะส่วนน้อยที่ขอบของบริเวณปลอดพาหะอธิบายได้จากสมการ (2.19) กฎของรอยต่อ p_{n0} และ n_{p0} ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การกระจายความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ (ก) เมื่อไม่ได้รับแรงดันไบอัส (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัส V_A [5]

- เมื่อ p_{p0} คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านพี
- เมื่อ n_{p0} คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านพี
- เมื่อ n_{n0} คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านเอ็น
- เมื่อ p_{n0} คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านเอ็น

ส่วนการลดลงของพาหะส่วนน้อยเมื่อระยะห่างออกไปจากบริเวณปลอดพาหะจะเกิดการรวมตัว (recombination) ของพาหะทำให้ปริมาณของพาหะที่ถูกฉีดเข้ามาลดลงจนกระทั่งในที่สุดที่ระยะ L_p และ L_n ความหนาแน่นของประจุส่วนน้อยจะลดลงจนเป็นศูนย์ เนื่องจากความหนาแน่นของประจุพาหะส่วนมาก n_{n0} และ p_{p0} มีค่ามากกว่าปริมาณของพาหะที่ถูกฉีดเข้ามา รอยต่อมาก ดังนั้นค่าของประจุพาหะดังกล่าวที่บริเวณรอยต่อจะไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้ว่าจะมีการฉีดพาหะเข้ามา รอยต่อ แต่จะถือว่ามีความน้อยมาก ดังนั้นความหนาแน่นกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อจึงเป็นความหนาแน่นกระแสการแพร่ของประจุพาหะส่วนน้อย ซึ่งสามารถแยกพิจารณาเป็นความหนาแน่นกระแสโฮลและความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอนและจะได้เป็นความหนาแน่นของกระแสรวมทั้งหมดในรอยต่อพีและเอ็น [13] คือ

$$J = J_p(x_n) + J_n(-x_p) = (ni)^2 \left(\frac{N_A p_{n0}}{L_p} + \frac{N_D n_{p0}}{L_n} \right) \left(\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right) \quad (2.17)$$

สมการ (2.17) เป็นความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของรอยต่อพี-เอ็น เราอาจนิยามตัวพารามิเตอร์ J_s ดังนี้คือ

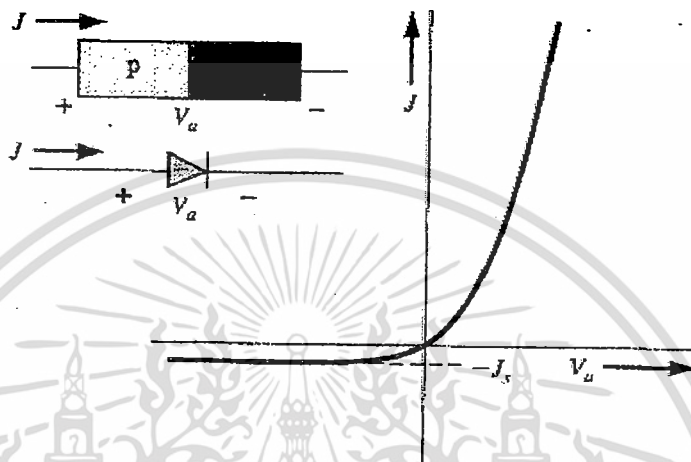
$$J_s = (ni)^2 \left(\frac{N_A p_{n0}}{L_p} + \frac{N_D n_{p0}}{L_n} \right) \quad (2.18)$$

ดังนั้นสมการ (2.19) เขียนใหม่ได้เป็น เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J = J_s \left(\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right) \quad (2.19)$$

เมื่อ N_A คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้รับ (อะตอม/ลบ.ซม)

N_D คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือให้ (อะตอม/ลบ.ซม)



รูปที่ 2.21 คุณสมบัติกระแส-แรงดันในอุดมคติของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น[13]

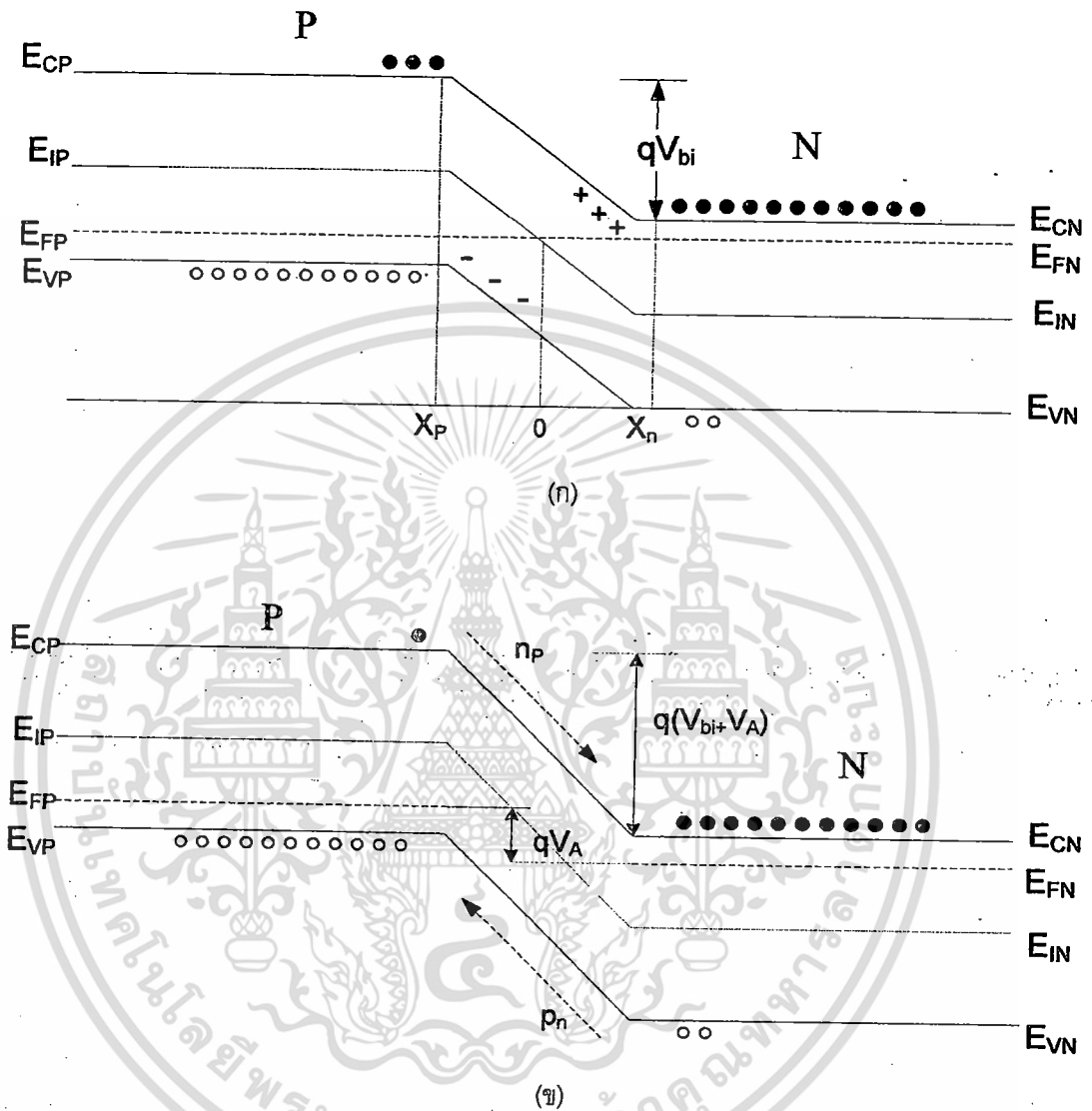
สมการ(2.19) เป็นที่รู้จักในนาม “สมการไดโอดในอุดมคติ” ที่อธิบายถึงความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของรอยต่อพี-เอ็นตลอดช่วงกว้างของกระแสและแรงดัน แม้ว่าสมการ (2.19) หาได้จากการศึกษาสมมติฐานแรงดันไบอัสไปข้างหน้า ($V_a > 0$) แต่ไม่มีเหตุผลใดที่จะห้ามไม่ให้ V_a มีค่าเป็นลบไม่ได้ (ไบอัสย้อนกลับ) สมการ (2.19) ถูกพลอตลงในรูปที่ 2.21 เป็นความสัมพันธ์กับแรงดันไบอัสไปข้างหน้า V_a ถ้าแรงดัน V_a เป็นลบ (ไบอัสย้อนกลับ) ด้วยค่าสองสาม kT/e โวลต์ แล้วค่าความหนาแน่นกระแสนย้อนกลับจะไม่ขึ้นกับค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ ตัวพารามิเตอร์ J_s ถูกอ้างอิงว่าเป็นความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (reverse-saturation current density) คุณสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นจะเห็นได้ชัดว่าไม่เป็นแบบสองทาง

2.3.3 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

การให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ (Reverse bias : $-V_A$) ทำได้โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าที่ด้านพีเป็นลบ เมื่อเทียบกับด้านเอ็นโดยการกำหนดให้ความต้านทานในส่วนของเนื้อสารกึ่งตัวนำมีค่าน้อยมาก จึงพิจารณาได้ว่าไม่มีแรงดันตกคร่อมในส่วนของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นแรงดัน V_A ทั้งหมดจะไปปรากฏที่รอยต่อพี-เอ็นและมีทิศทางเดียวกับศักย์ภายในรอยต่อจึงเกิดการเสริมกันของแรงดัน ทำให้กำแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $(V_{bi} + V_A)$ ทำให้สนามไฟฟ้าภายในรอยต่อมีขนาดเพิ่มขึ้น ประจุพาหะโฮลทางด้านพีอิเล็กทรอนิกส์ทางด้านเอ็นจะถูกสนามไฟฟ้าผลักให้เคลื่อนที่ห่างออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นว่าเว็บไซต์ของหน่วยงานราชการไม่ควรเผยแพร่เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้เกี่ยวข้อง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

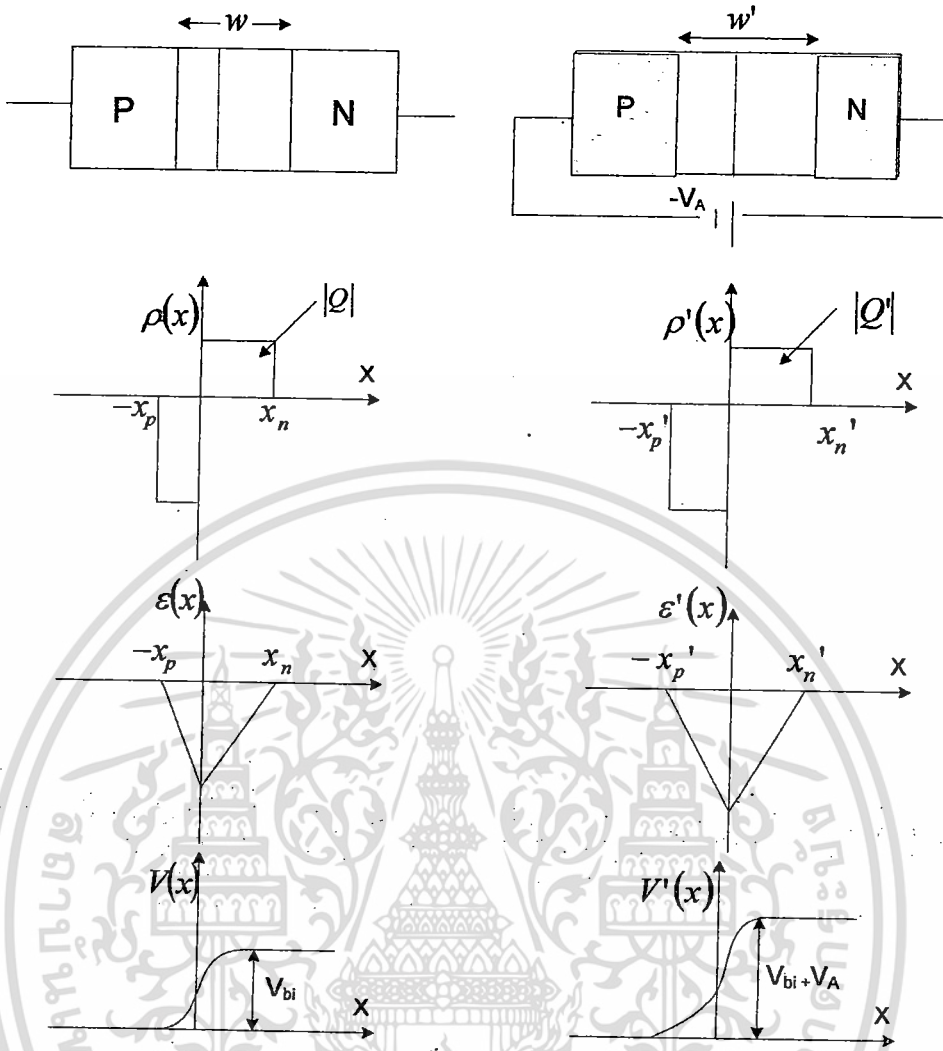
ทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายกว้างมากขึ้น ระดับพลังงานเฟอร์มิของด้านพีจะสูงกว่าด้านเอ็น qV_A ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 เปรียบเทียบลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อ (ก) เมื่อไม่ได้รับไบอัส กับ(ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$ [5]

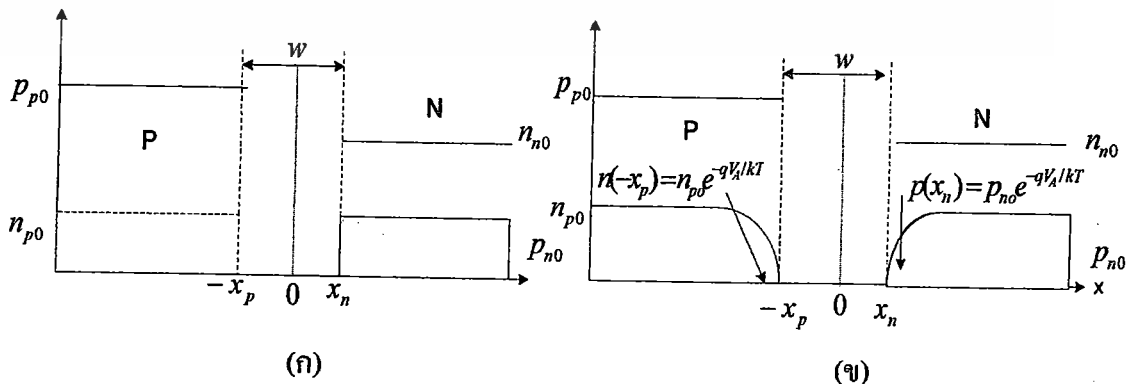
เมื่อกำแพงศักย์เพิ่มขึ้นจึงเกิดการแพร่ของประจุพาหะได้น้อยลง ทำให้โฮลจากด้านพีและอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ มีแต่เพียงพาหะส่วนน้อยเท่านั้นที่สามารถจะเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปได้จึงทำให้เกิดมีกระแสค่าหนึ่งที่มีขนาดน้อยมากไหลผ่านรอยต่อ เรียกกระแสนี้ว่า กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ และจะพบว่ากรณีที่สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดความกว้างบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้น หรือก็คือการเพิ่มขึ้นของประจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อนั่นเอง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่

2.23



รูปที่ 2.23 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่ออยู่ในภาวะสมดุลกับเมื่อได้รับแรงดันไบอัส $-V_A$ [5]

ส่วนการลดลงของพาหะส่วนน้อยที่ขอบของบริเวณปลอดพาหะอธิบายได้จากสมการกฎของรอยต่อ p_n และ n_p ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การกระจายความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ โยชนด้านการค้า เอกสารนี้เป็นเอกสาร... ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งทำ (ก) เมื่อไม่ได้รับแรงดันไบอัส (ข) เมื่อได้รับแรงดันไบอัส $-V_A$ ที่การนำไปใช้

ในขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$ เมื่อแทนค่าลงไปในสมการ (2.19) แล้วจะพบว่าเทอมของ $(e^{qV_A/kT})$ จะมีค่าน้อยกว่า 1 มากๆ ดังนั้น

$$I_R = -I_0 = -qAn_i \quad (2.20)$$

2.3.4 ผลกระทบจากอุณหภูมิที่มีผลต่อรอยต่อพี-เอ็น[20]

ความหนาแน่นกระแสในตัวย้อนกลับในทางอุดมคติ J_s หาได้จากสมการที่ (2.18) เป็นความสัมพันธ์ของความเข้มข้นพาหะส่วนน้อยที่สมดุลความร้อน n_{p0} และ p_{n0} ความเข้มข้นเหล่านี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ n_i^2 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิอย่างมาก ดังสมการที่ (2.21)

$$n_i = 2 \left(\frac{2kT\pi}{h^2} \right)^{3/2} (m_n^* m_p^*)^{3/4} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (2.21)$$

หรือ

$$n_i = K T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (2.22)$$

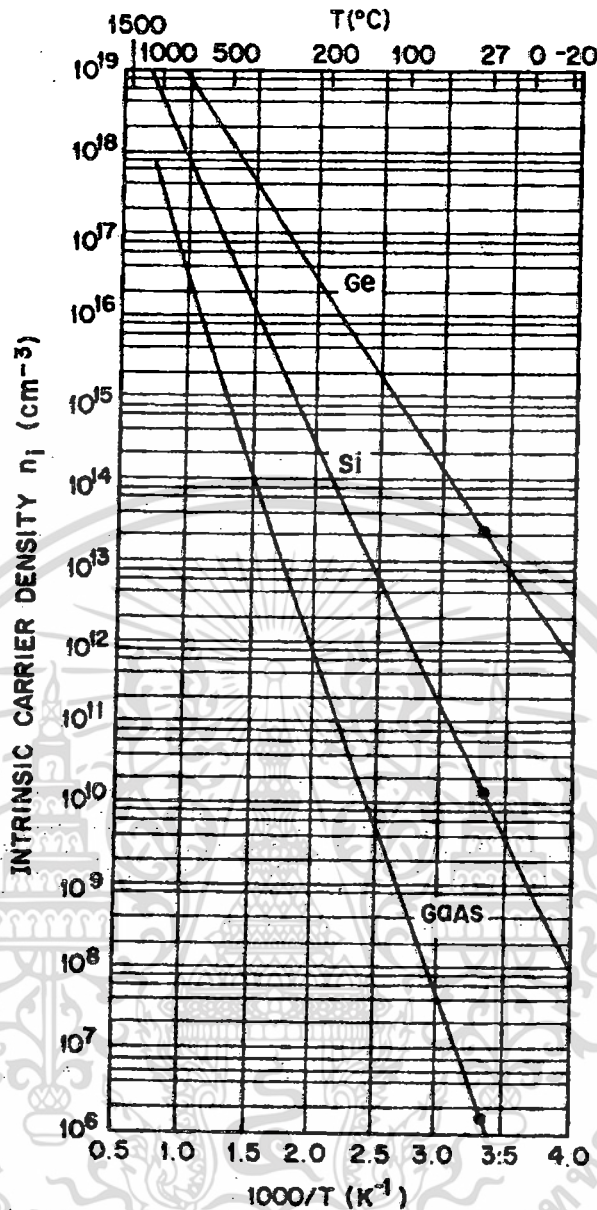
โดยที่

n_i คือ ความหนาแน่นของพาหะในสารกึ่งตัวนำสารอินทรินซิก หรือ ความหนาแน่นอินทรินซิก (Intrinsic concentration)

K คือ ค่าที่คงที่ ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ $= 2 \left(\frac{2k\pi}{h^2} \right)^{3/2} (m_n^* m_p^*)^{3/4}$

E_g คือ ขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

ดังนั้นจากสมการที่(2.20) ส่วนที่เป็นผลต่ออุณหภูมิคือ $T^{3/2}$ และ E_g ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับส่วนของเฟอร์มิอินทรินซิก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าของ n_i จะมีค่ามากขึ้น จึงทำให้อิเล็กตรอนวาเลนซ์ ที่อยู่ต่ำกว่าระดับชั้น E_v ลงไปสามารถที่จะถูกกระตุ้นขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ด้วยจำนวนอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าและโฮลจึงมีปริมาณเพิ่มขึ้น ดังนั้นการที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าของ n_i มีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.25 และจากกราฟสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้เห็นว่า n_i เปลี่ยนตามอุณหภูมิอย่างเป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.25 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อ n_i ของสารกึ่งตัวนำ GaAs, Si และ Ge[8]

และสามารถนำมาเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.23)[13]

$$J_s \propto n_i^2 \propto (T)^3 \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \tag{2.23}$$

จากสมการ (2.21) จะเห็นว่าหาทำการเปรียบเทียบโดยการเพิ่มอุณหภูมิขึ้น $10^\circ C$ จากอุณหภูมิห้องจะให้ความสัมพันธ์ดังนี้

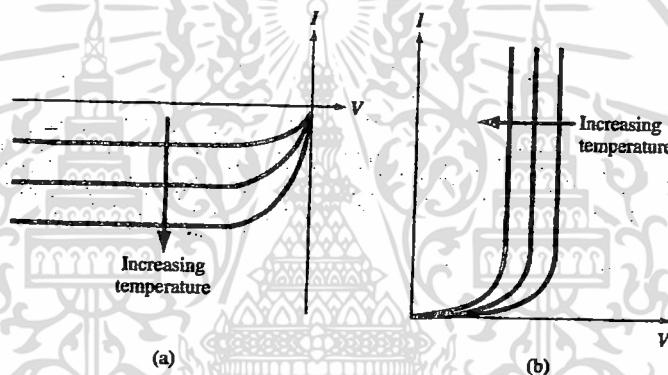
$$\frac{J_s(310K)}{J_s(300K)} = \left(\frac{310}{300}\right)^3 \frac{\exp[-1.12/(8.62 \times 10^{-5})(310)]}{\exp[-1.12/(8.62 \times 10^{-5})(300)]}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$\frac{J_s(310\text{K})}{J_s(300\text{K})} = 4.46$$

ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทุกๆ 10°C จากอุณหภูมิห้อง จะทำให้ J_s มีค่าเพิ่มขึ้น 4.46 ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับขณะได้รับ ไบอัสตรง (forward-bias) จากสมการที่ (2.19) จะทำให้เห็นว่าแพกเตอร์ที่มีผลต่ออุณหภูมิคือ J_s และ $\left(\frac{eV_a}{kT}\right)$ ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิด้วย เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แรงดันไบอัสไปข้างหน้าจะน้อยลงเพื่อที่จะได้กระแสไดโอดค่าเดียวกัน ถ้าให้แรงดันจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงในกระแสไบอัสไปตรงกับอุณหภูมิจะมีความไวน้อยกว่ากระแสอิมิตัว ซึ่งผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 ผลการจำลองผลกระทบของอุณหภูมิต่อรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกับดังรูป (a) และ ไบอัสไปข้างหน้า (b) [13]

2.4 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการพังทลายแบบซีเนอร์ (effect to junction breakdown)[]

ปรากฏการณ์การพังทลายแบบซีเนอร์ มักเกิดขึ้นกับรอยต่อของไดโอดที่มีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือสูงๆ ($p^+ - n$) เช่นมีค่าสูงกว่า 10^{17} อะตอม/ลบ.ซม ดังนั้นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อจะมีขนาดแคบ เช่นน้อยกว่า 100 Å เป็นต้น จึงทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อมีค่าสูงมากเช่น 10^6 โวลต์/ซม. แม้ว่าจะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับเพียงไม่กี่โวลท์ก็ตาม ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าหรือ Field emission หรือ Field ionization ของอะตอมสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยต่อและอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและเคลื่อนที่เข้าไปด้านเอ็นส่วน โสเคลื่อนที่ไปด้านพี ทำให้เกิดกระแสย้อนกลับเป็นจำนวนมากไหลผ่านไดโอดและปรากฏการณ์เช่นนี้ถูกเรียกว่าการพังทลายแบบซีเนอร์ หรือ ปรากฏการณ์ซีเนอร์ (Zener effect)

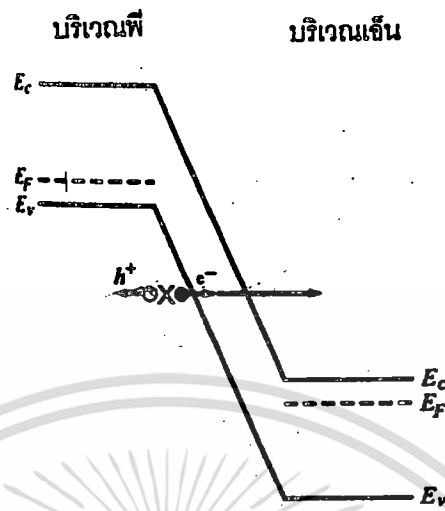
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอธิบายกลไกการเกิดการพังทลายแบบซีเนอร์ นิยมใช้ปรากฏการณ์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ หรือการทะลุอุโมงค์ (Tunneling effect) ในทฤษฎีควอนตัม โดยโอกาสการเกิดการทะลุผ่านหรือทะลุอุโมงค์ หรือ tunneling จะมีค่ามากยิ่งขึ้นหากขนาดความกว้างของกำแพงศักย์ (d) มีค่าน้อยลงดังรูปที่ 2.27 หรือกำแพงศักย์มีขนาดแคบๆ การทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะจะมีโอกาสเกิดได้ดียิ่งขึ้น ขนาดของความกว้างบริเวณปลอดพาหะจึงมีค่าน้อยหรือแคบ เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับแม้เพียงเล็กน้อย สนามไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะก็จะมีค่าสูง และกำแพงศักย์ก็จะมีค่าสูงด้วย เนื่องจากกำแพงศักย์มีขนาดแคบๆ กระทั่งทำให้เกิดการทะลุอุโมงค์ (Tunneling) ผ่านกำแพงศักย์ในย่านปลอดพาหะ ไปยังแถบความนำทางด้านเอ็น ซึ่งมีสถานะพลังงานที่ว่างจำนวนมากได้ ทำให้เกิด กระแสทะลุอุโมงค์ หรือ ที่เรียกว่า Tunneling current และทำให้กระแสในวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย ปรากฏการณ์การทะลุผ่านหรือ Tunneling นี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อขนาดของกำแพงศักย์(d) มีขนาดแคบๆ(<100 Å) ดังนั้นรอยต่อนี้จึงควรต้องมีความหนาแน่นอะตอมสารเจือสูง เช่น ไดโอดประเภทอัลลอย(Alloy diode) เมื่อได้รับกระแสย้อนกลับขนาดของกำแพงศักย์สูงขึ้น แต่ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะถูกพิจารณาว่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก จนกระทั่งทำให้เกิดการทะลุผ่าน ดังนั้นแม้ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่ำๆ และสามารถหาค่าความหนาแน่นของกระแสรวม J_T ได้ดังสมการ (2.22)

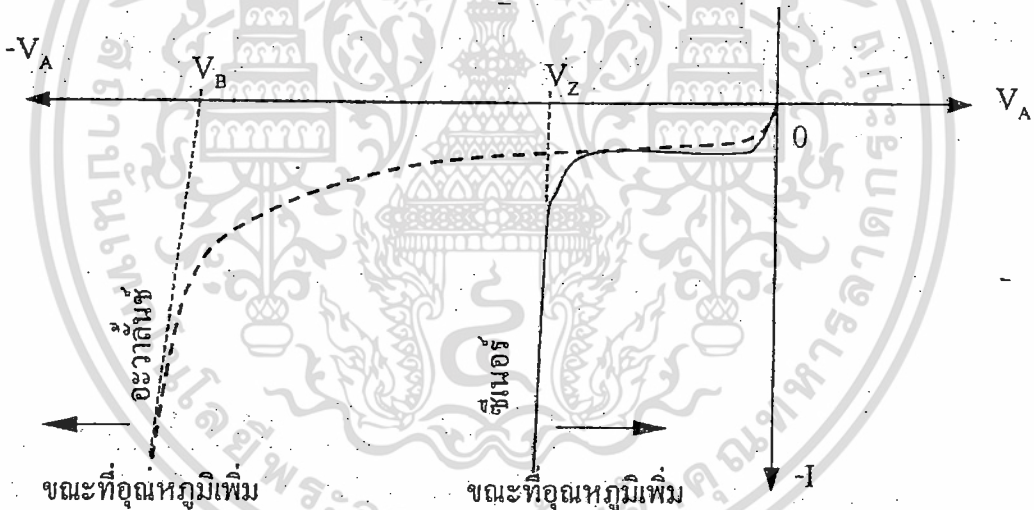
$$J_T = \frac{\sqrt{2m^*} q^3 V_R}{4\pi^2 \hbar \sqrt{E_g}} \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*} E_g^{3/2}}{3q\hbar}\right) \quad (2.22)$$

รอยต่อประเภทนี้ก็สามารถทำให้เกิดการพังทลายได้ เช่น สำหรับ ไดโอดที่ทำจากซิลิคอนที่ 300K ที่แรงดันพังทลาย (V_B) ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 5 โวลต์ จะถูกพิจารณาว่าเป็นการเกิดของปรากฏการณ์ซีเนอร์ (Zener effect)

ยิ่งแรงดันไบอัสย้อนกลับยิ่งสูง จำนวนอิเล็กตรอนวาเลนซ์ในแถบวาเลนซ์ด้านพี ที่จะสามารถทะลุผ่านกำแพงศักย์มายังแถบความนำด้านเอ็นก็จะยิ่งมากขึ้น ทำให้กระแสมีค่าเพิ่มมากขึ้น นอกจากค่าแรงดันพังทลายจะช่วยบอกชนิดของการพังทลายแล้ว ยังพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าของแรงดันพังทลายแบบซีเนอร์จะเปลี่ยนแปลง โดยลดลง ซึ่งต่างจากแรงดันพังทลายแบบอะวาแลนซ์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิและนอกจากนี้แล้วการเพิ่มขึ้นของกระแสพังทลายแบบซีเนอร์ จะมีลักษณะเป็น ไปอย่างทันทีทันใด หรือเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าในกรณีการพังทลายแบบอะวาแลนซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.27 การเกิดปรากฏการณ์การทะลุผ่านก้ำแพงศักย์ (Tunneling)



รูปที่ 2.28 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติการพังทลายแบบอวาถันซ์และแบบซีเนอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ

ในการศึกษาพฤติกรรมของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์ เป็นส่วนสำคัญยิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจร PTAT แบบพื้นฐาน

ดังนั้นโครงการนี้ได้ทำการประดิษฐ์ชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิเพื่อใช้วัดผลคุณสมบัติที่มีผลต่ออุณหภูมิของรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์ โดยชุดทดสอบนี้จะมีขนาดที่เหมาะสมที่จะบรรจุรอยต่อพี-เอ็น รอยต่อซีเนอร์ และวงจรตรวจวัดอุณหภูมิได้ รวมถึงการประหยัดเวลาในการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ ในส่วนของวงจร PTAT และความต้านทาน R_{out} อยู่ในระบบเปิด เพื่อลดผลกระทบอันเกิดจากข้อจำกัดของทรานซิสเตอร์ในส่วนของวงจร PTAT รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าความต้านทาน R_{out} ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่แท้จริงของอุณหภูมิที่มีผลต่อรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์ โดยชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -60°C ถึง 160°C

3. กระบวนการสร้างชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ

3.1 การสร้างชุดกำเนิดอุณหภูมิ

ชุดกำเนิดอุณหภูมิ คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งให้กำเนิดอุณหภูมิเพื่อใช้ในการสร้างสภาวะจำลองในการทดสอบรอยต่อพี-เอ็น รอยต่อซีเนอร์ และวงจรตรวจวัดอุณหภูมิที่ถูกสร้างขึ้น ในการทดสอบที่อุณหภูมิ -60°C จะใช้ไอระเหยของไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitro-gen) ในการลดอุณหภูมิให้ต่ำลง และใช้ความร้อนจากแท่งฮีตเตอร์และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Control) ในการควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามต้องการจนถึงอุณหภูมิ 160°C โดยในการทดสอบรอยต่อพี-เอ็น รอยต่อซีเนอร์ และวงจรตรวจวัดอุณหภูมิจะถูกบรรจุอยู่ในภาชนะปิดที่ทำจากทองเหลือง และวางไว้ในกล่องโฟมที่เหมาะสมเพื่อให้ไอระเหยของไนโตรเจนเหลวทั่วถึง โดยมีไม้เป็นฐานรอง ภาชนะปิดที่ทำจากทองเหลือง ดังนั้นกล่องโฟมควรมีขนาดและสูงพอประมาณจะทำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

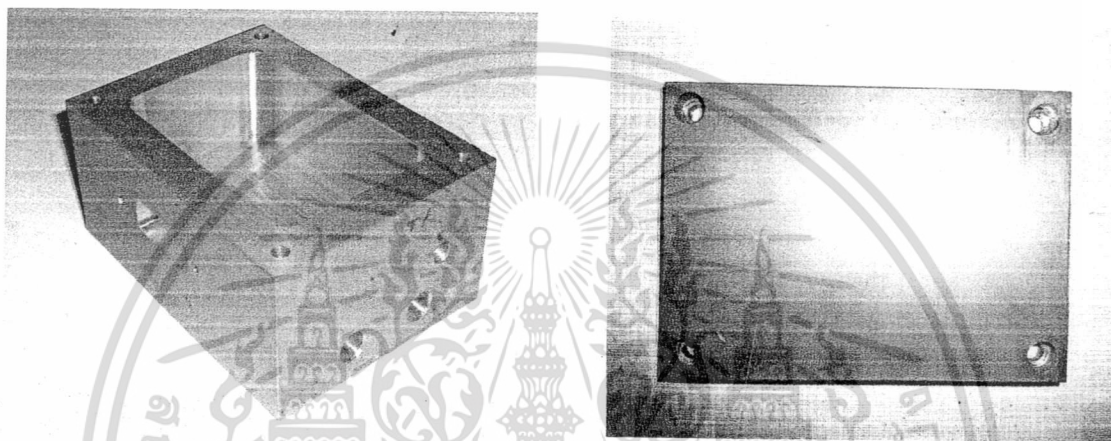
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1) โลหะทองเหลืองมี 2 ชั้น

- ชั้นที่ 1 (กว้าง×ยาว×สูง) = 90×125×55 mm (ตัวกล่อง)

- ชั้นที่ 2 (กว้าง×ยาว×สูง) = 90×125×8 mm (ฝาปิด)

ทำหน้าที่เป็นระบบปิดสำหรับทดสอบรอยต่อพี-เอ็น รอยต่อซีเนอร์ และวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ ซึ่งภายในมีช่องสำหรับฝังแท่งฮีตเตอร์และใส่ PT 100 ไว้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดกำเนิดอุณหภูมิสำหรับทดสอบวงจรตรวจวัดที่อุณหภูมิ -60°C ถึง 160°C

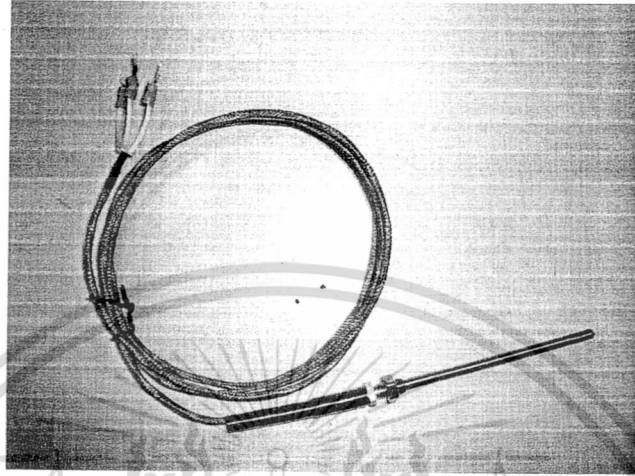
2) แท่งฮีตเตอร์ มี 2 แท่ง ขนาด 400 W 220 V เส้นผ่าศูนย์กลาง 9 mm ยาว 110 mm ทำหน้าที่กำเนิดความร้อน โดยในการทดสอบนี้อุณหภูมิสูงสุดที่ 160°C ไว้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายแท่งฮีตเตอร์ที่ใช้งานจริงในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการค้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

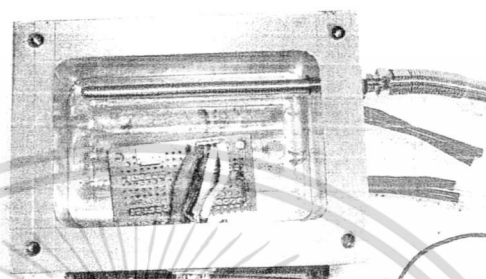
3) RTD : PT 100 ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิและส่งสัญญาณ ไปยังตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control) ที่อยู่ภายนอกดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ภาพถ่าย RTD : PT 100 ที่ใช้งานจริงในการทดสอบ

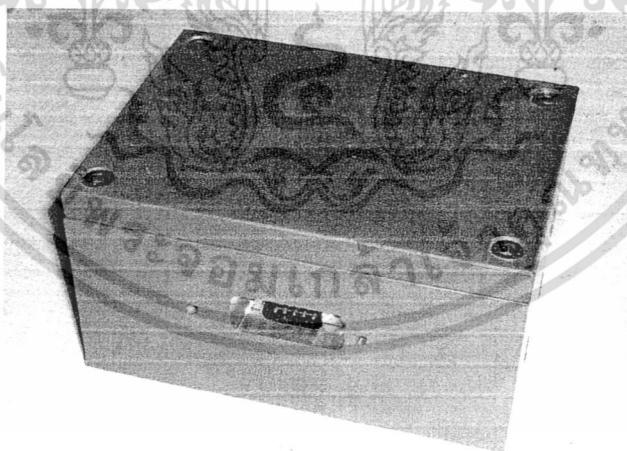
3.1.2 กระบวนการสร้างชุดกำเนิดอุณหภูมิ

1. เจาะช่องเพื่อฝังแท่งฮีตเตอร์และตำแหน่ง PT 100 รวมถึงพอร์ตซีเรียล (Serial) ที่ใช้เป็นช่องทางจ่ายไฟเลี้ยงวงจรและวัดค่าแรงดันในการทดสอบเข้าไปภายในโลหะทองเหลืองชิ้นที่ 1 และทำการมิลลิ่งโลหะชิ้นนี้เพื่อให้เกิดเป็นหลุม (กว้าง×ยาว×สูง) = 60×90×35 mm ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งบริเวณภายในระบบปิดสำหรับการวางรอยต่อพี-เอ็น รอยต่อซีเนอร์ และวงจรตรวจวัดอุณหภูมิที่ต้องการทดสอบ หลังจากนำโลหะทองเหลืองทั้ง 2 ชิ้นมาประกบกัน



รูปที่ 3.4 ตำแหน่ง PT 100 และแท่งฮีตเตอร์ที่ถูกฝังอยู่ภายในโลหะทองเหลืองชั้นที่ 1

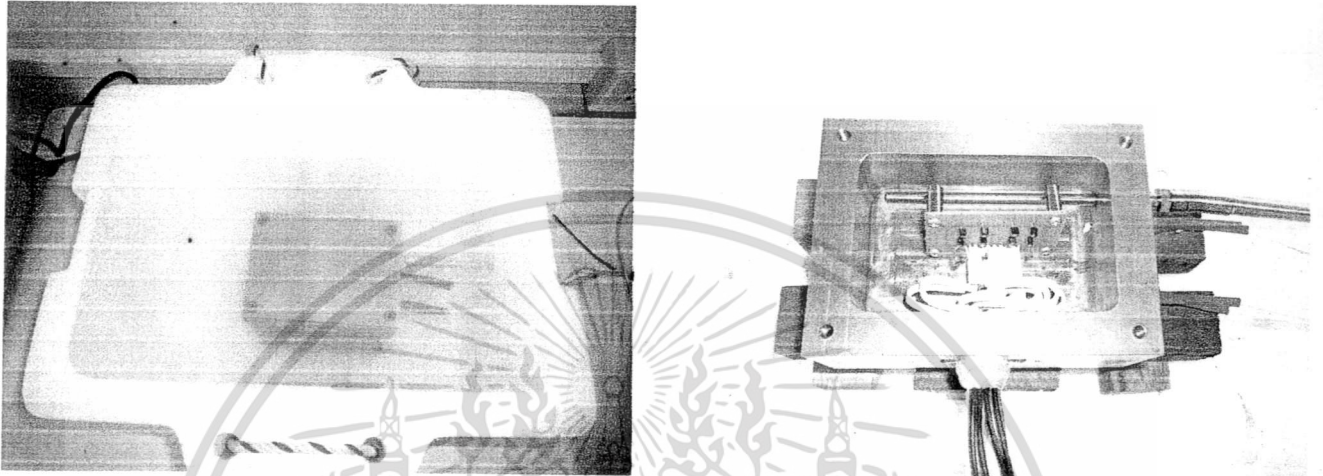
2. เจาะรูทั้ง 4 ให้กับโลหะทองเหลืองทั้ง 2 ชั้นเพื่อให้สามารถขันน็อตประกบติดกันและทำการใส่พอร์ตซีเรียลไว้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.5 โลหะทองเหลืองทั้ง 2 ชั้นเมื่อขันน็อตประกบติดกันและใส่พอร์ตซีเรียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการประกอบชุดกำเนิดอุณหภูมิเข้าด้วยกันดังรูปที่ 3.5 โดยนำโลหะทองเหลืองที่ทำ การฝังแท่งฮีตเตอร์และจัดวาง PT 100 แล้วนำโลหะทองเหลืองวางบนฐานรองที่เป็นไม้ในระดับที่ เหมาะสมในกล่องโฟมดังตำแหน่งดังรูป



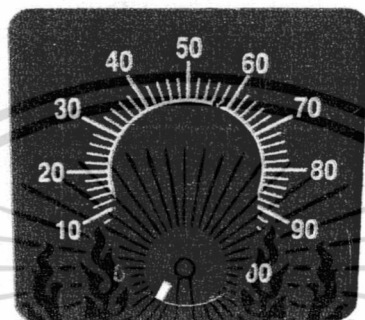
รูปที่ 3.6 ชุดกำเนิดอุณหภูมิที่ประกอบเข้าด้วยกัน

3.2 การสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิ

ชุดควบคุมอุณหภูมิ คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของชุดกำเนิดอุณหภูมิเพื่อให้ ได้ตามความต้องการในการทดสอบผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของรอยต่อพี-เอ็น และรอยต่อซี เนอร์ และวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ เพื่อให้มีประสิทธิภาพ รวมถึงให้ทำงานป็นเชิงเส้น

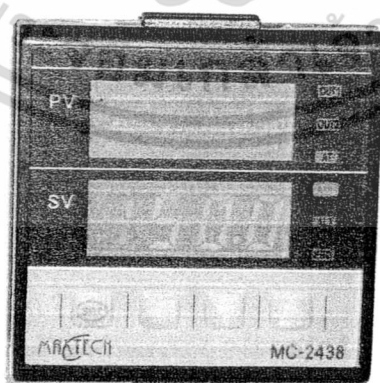
3.2.1 อุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบของชุดควบคุมอุณหภูมิ

1. ดิมเมอร์ (Dimmer) หน้าที่ปรับตั้งค่าแหล่งจ่ายแรงดันให้เหมาะสมกับการควบคุมความไวในการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิจากแท่งฮีตเตอร์ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายลักษณะดิมเมอร์ที่ใช้งานจริงในการทดสอบ

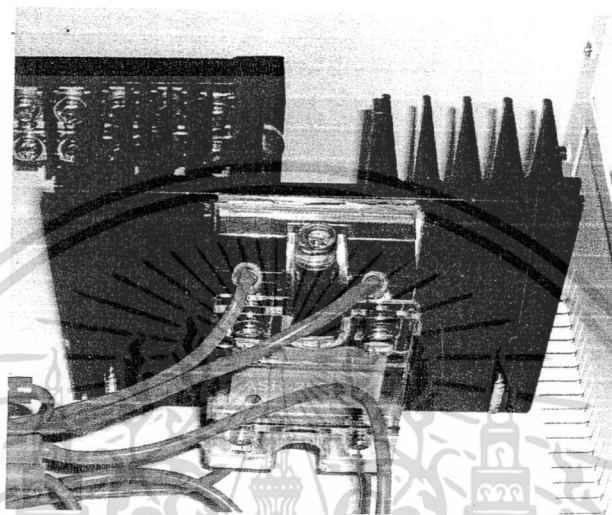
2. อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Control) ทำหน้าที่ปรับตั้งค่าควบคุมอุณหภูมิตามต้องการ โดยจะรับสัญญาณจาก PT 100 ในส่วนของชุดกำเนิดอุณหภูมิเพื่อไปควบคุมความร้อนที่เกิดจากแท่งฮีตเตอร์ให้ได้ตามความต้องการดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้งานจริงในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

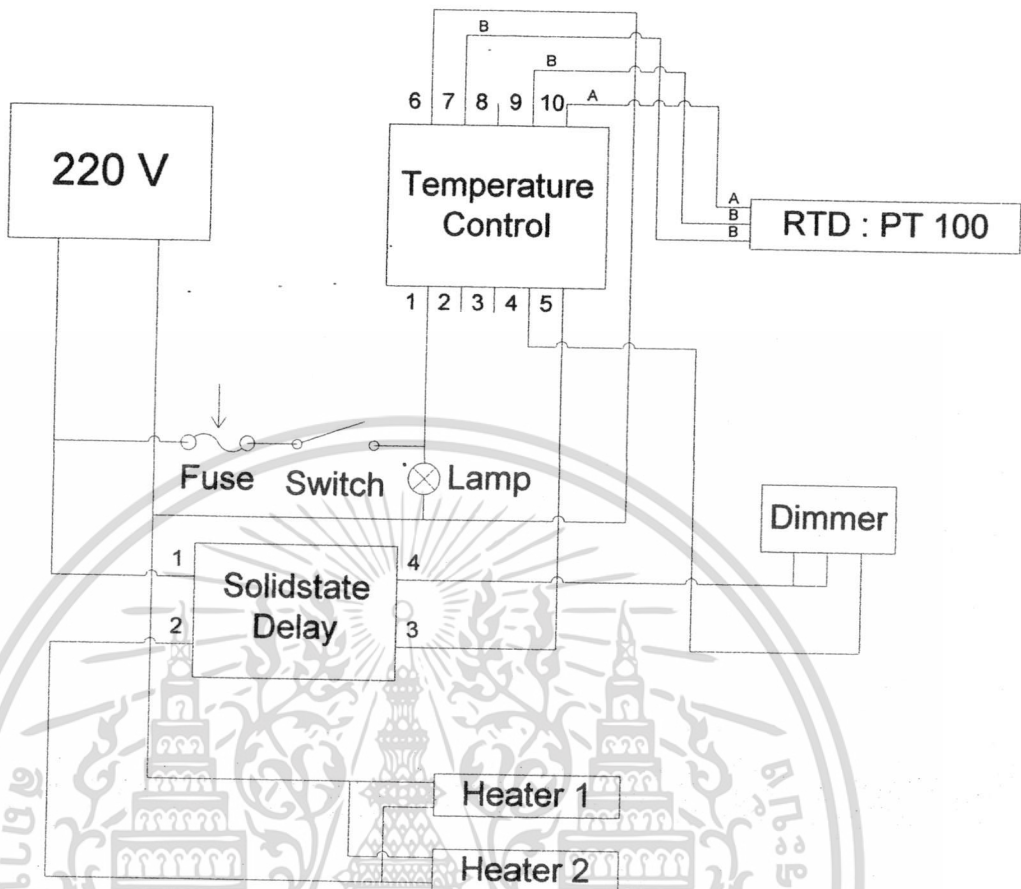
3. โซลิตสเดทรีเลย์ (Solidstate Delay) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิด-ปิดให้แก่งีสเตอร์ โดยจะทำงานเมื่อได้รับแรงดันจากอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิเข้ามาทำให้เกิดการเปิด-ปิดสวิตช์ตามค่าที่ปรับตั้งไว้ที่อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ และผ่านตัวคิมเมอร์ในการควบคุมแรงดัน อีกทั้งควรมีฮีตซิงค์ระบายความร้อนให้ตัวมันด้วยดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายโซลิตสเดทรีเลย์ ที่ใช้งานจริงในการทดสอบ

3.2.2 กระบวนการสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิ

1. ทำการต่อวงจร โดยนำ คิมเมอร์ อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ และโซลิตสเดทรีเลย์ ต่อวงจรตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.10 ลักษณะการต่อวงจรชุดควบคุมที่ใช้ในการทดสอบ

2.ทำการประกอบลงกล่องและสร้างจุดเชื่อมต่อกับชุดกำเนิดอุณหภูมิตั้งรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายชุดควบคุมอุณหภูมิที่ประกอบลงกล่องเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

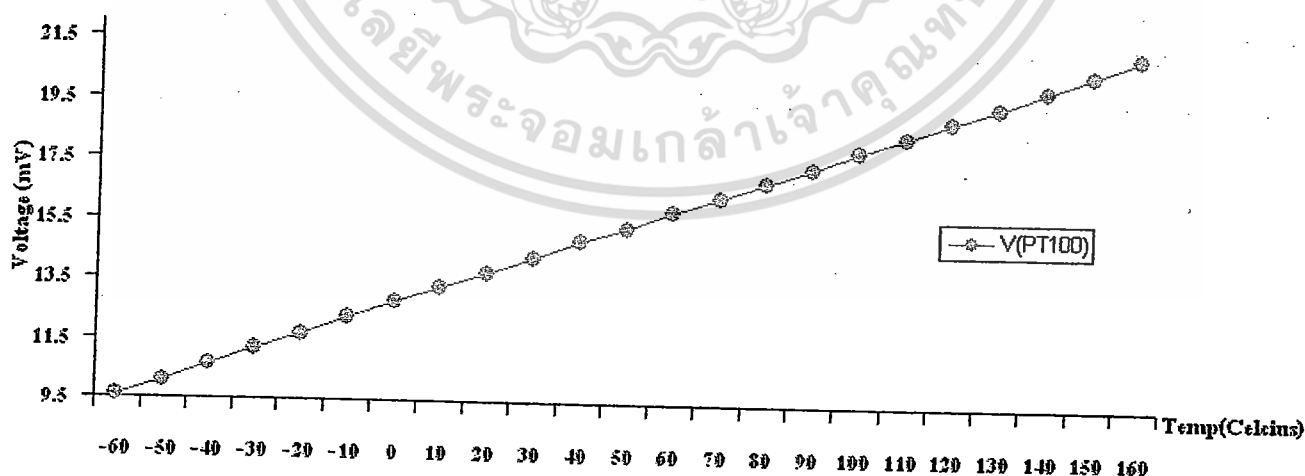
3.3 การทดสอบการทำงานของชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ

ในการทดสอบชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิจะทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ -60°C ถึง 160° ดังนั้นต้องมีการตั้งค่าชุดทดสอบนี้และวิธีการทดสอบที่ถูกต้องเพื่อให้ผลที่ออกมามีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุด รวมถึงการนำไปทดสอบผลการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิของรอยต่อพี-เอ็น รอยต่อซีเนอร์ และวงจรตรวจวัดอุณหภูมิต่อไป

3.3.1 ขั้นตอนการทดสอบการทำงานของชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ

การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ -60°C ถึง 160°C มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการเชื่อมต่อชุดควบคุมอุณหภูมิเข้ากับชุดกำเนิดอุณหภูมิ
2. เทไนโตรเจนเหลวลงในกล่องโฟม แล้วทำการปิดกล่องโฟมเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิภายในกล่อง
3. ปรับคิมเมอร์เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ ในการทดสอบนี้ควรปรับไปที่ตำแหน่งกึ่งกลาง เพื่อให้ได้ความเป็นเชิงเส้นของชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิมากที่สุด
4. ตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการที่อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Control)



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันของ PT100 ต่ออุณหภูมิตั้งแต่ -60°C ถึง 160°C ระโยชน์ด้านการค้า เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัทฯ การใช้งานโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ซ้ำได้ หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายขาย

จากการทดสอบการทำงานพบว่าเมื่อตั้งอุณหภูมิที่อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำลงอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิจะยังคงสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้โดยจะคอยตรวจสอบอุณหภูมิที่อ่านได้จาก PT 100 และอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้ให้ตรงกัน หากอุณหภูมินั้นลดต่ำเกินไปอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ โดยทำงานเป็นสวิตช์ปิดทำให้มีแรงดันส่งไปให้กับโซลิตสเตรียลทำงานโดยผ่านคิมเมอร์เพื่อควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับแท่งฮีตเตอร์กำเนิดความร้อนให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิจะยังคงรักษาอุณหภูมิให้คงที่ตามต้องการ โดยทำงานเป็นสวิตช์เปิดทำให้แท่งฮีตเตอร์หยุดกำเนิดความร้อน

ในการทดสอบจากการตั้งค่าอุณหภูมิต่างๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าของ PT 100 เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิตั้งแต่ -60°C ถึง 160°C ดังรูปที่ 3.11 โดยความไวในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ $0.12\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ และเมื่อลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิตั้งแต่ 160°C ถึง -60°C จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าของ PT 100 ลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกันโดยไม่เกิดปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

3.3.2 สรุปผลการสร้างชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ

จากการทดสอบชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิเบื้องต้นที่อุณหภูมิตั้งแต่ -60°C ถึง 160°C เมื่อตั้งค่าชุดทดสอบและทำตามวิธีการทดสอบที่ถูกต้องแล้วพบว่า ชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมินี้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามต้องการ โดยเฉพาะการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำๆ ภายใต้อุณหภูมิในช่วงที่อุณหภูมิของไอระเหยในโตรเจนเหลว การควบคุมอุณหภูมิสามารถทำได้โดยง่ายเนื่องจากความร้อนจากแท่งฮีตเตอร์จะสามารถรักษาระดับอุณหภูมิไว้ได้ และอาศัยอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิในการควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามต้องการ นอกจากนี้จากการทำระบบปิดให้โลหะทองเหลืองยังเป็นส่วนช่วยป้องกันการควบแน่น ขณะที่ทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนเหลวและยังรักษาอุณหภูมิให้คงที่ไว้ได้ อีกทั้งผลของแรงดันของ PT100 ต่ออุณหภูมิมิมีความเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงการทดสอบอีกด้วยแม้จะเป็นช่วงอุณหภูมิต่ำๆ ดังได้กล่าวมาแล้ว

ดังนั้นชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมินี้จึงสามารถนำไปใช้ทดสอบรอยต่อพี-เอ็น รอยต่อซีเนอร์ และวงจรตรวจวัดอุณหภูมิที่ถูกสร้างขึ้นที่อุณหภูมิตั้งแต่ -60°C ถึง 160°C ได้ดีโดยสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดช่วงการทดสอบ และยังสามารถพัฒนาใช้ที่อุณหภูมิต่ำหรือสูงกว่าที่ทดสอบได้ต่อไป

กระบวนการออกแบบวงจร PTAT แบบมีซีเนอร์ไดโอดและการทดสอบผลของรอยต่อพี-เอ็น รอยต่อซีเนอร์ วงจรตรวจวัดอุณหภูมิในทางปฏิบัติ

จากวงจร PTAT พื้นฐานที่ใช้เป็นแบบวงจรเทอร์โมทรานซิสเตอร์ต่ออนุกรมกับความต้านทาน R_L เกิดข้อด้อยในส่วนของระดับแรงดันเอาต์พุตที่ได้อยู่ในระดับมิลลิโวลต์สัญญาณที่ได้จึงถูกรบกวนได้ง่าย เป็นผลให้สัญญาณเอาต์พุตมีความผิดพลาดค่อนข้างสูง ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตต่ออุณหภูมิต่ำ เป็นผลให้ความไวในการตอบสนองต่ออุณหภูมิมีค่าค่อนข้างต่ำตามไปด้วย ดังนั้น โครงงานนี้จึงได้นำวงจร PTAT แบบมีซีเนอร์ไดโอดและไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นมาใช้ในการเพิ่มความไวในการตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยใช้รอยต่อพี-เอ็นทำงานไบอัสไปข้างหน้า (Forward bias) และรอยต่อซีเนอร์ทำงานไบอัสไปด้านหลัง (Reverse bias) เพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่ออุณหภูมิสูง และให้ระดับแรงดันเอาต์พุตค่าสูงพอโดยไม่ต้องต่อวงจรขยายเหมือนวงจรรวมเบอร์ AD590 ทั้งนี้วงจรที่น่าเสนอสามารถทนผลต่อสัญญาณรบกวนได้ดี ใช้งานเป็นอุปกรณ์ 3 ขา เนื่องจากมีแค่ขาแหล่งจ่ายแรงดัน กราวด์ และสัญญาณเอาต์พุต จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับวงจรอื่นได้ง่าย

ในส่วนของบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจร PTAT แบบมีซีเนอร์ไดโอดกับรอยต่อพี-เอ็นอนุกรมต่อกัน และแบบมีซีเนอร์ไดโอดกับรอยต่อซีเนอร์ เพื่อศึกษาว่าผลของรอยต่อใดที่ต่อกับวงจร PTAT ให้การตอบสนองต่ออุณหภูมิดีที่สุด รวมถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อพารามิเตอร์ในการสร้างวงจร PTAT ด้วยรอยต่อพี-เอ็น รอยต่อซีเนอร์ ไบโพล่าทรานซิสเตอร์ ชนิดความต้านทาน และวงจร PTAT ที่อนุกรมกับ R_{out} ในทางปฏิบัติจริง ในการทดสอบผลของอุณหภูมิที่มีต่อวงจร PTAT ทั้งแบบรอยต่อพี-เอ็นกับรอยต่อซีเนอร์ และรอยต่อซีเนอร์ กับรอยต่อซีเนอร์ การทดสอบผลของอุณหภูมิที่มีต่อวงจร PTAT ที่ระดับแรงดันฟังก์ชันของซีเนอร์ (V_Z) ต่างกัน และการทดสอบผลของอุณหภูมิที่มีต่อวงจร PTAT โดยการเพิ่มขนาดพื้นที่ที่อิมิตเตอร์ Q_3 มากกว่า Q_2 อยู่ 8 เท่า โดยการทดลองที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะใช้โปรแกรม Pspice ในการจำลองการทำงาน หรือ Simulation และทำการทดสอบวัดค่าจริงหรือ Tester กับชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ PTAT จากนั้นนำผลต่างๆ ของวงจรที่ได้ทำการทดสอบมาวิเคราะห์หาจุดเด่น จุดด้อย และข้อจำกัดของวงจรที่ทำการสร้างขึ้น เพื่อให้สามารถนำวงจรเหล่านี้ไปใช้ตรงตามความต้องการ และเหมาะสมกับงานแต่ละประเภท

4 หลักการออกแบบวงจร PTAT

จากที่ทราบมาแล้วในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.1.5.2 พบว่าโดยทั่วไปเทอร์โมทรานซิสเตอร์ประกอบไปด้วยวงจร PTAT อนุกรมกับความต้านทาน โดยอาศัยสัมพัทธ์ความแตกต่างของแรงดัน ΔV_{be} ภายใต้การควบคุมของกระแสคอลเลกเตอร์ในการวัดผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและแรงดันเอาต์พุตได้ดังสมการ (2.13) สรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมการความสัมพันธ์เอาต์พุตของเทอร์โมทรานซิสเตอร์โดยใช้โครงสร้างของวงจร PTAT อนุกรมกับความต้านทานเมื่อ $i_{c1} = i_{c2}$ หรือ $I_1 = I_2$

แรงดันเอาต์พุต	$V_{out} = V_T \ln(r)$
$\Delta V_{out} / \Delta T$	$\frac{\Delta(V_{be1} - V_{be2})}{\Delta T(T_1 - T_0)} = \frac{k(T_1 - T_0)}{q} \ln(r)$

จากตารางที่ 4.1 ทำให้เห็นว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้ขึ้นตรงกับ V_T (Thermal Voltage) มีค่าประมาณ 25 mV ที่อุณหภูมิ 27°C หรือที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นสัญญาณขนาดเล็กและอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่ออุณหภูมิ ($\Delta V_{out} / \Delta T$) ที่ไม่มากนัก เป็นปัญหาสำหรับผู้ออกแบบที่จะนำมาใช้งาน ดังนั้นโดยมากวงจรที่ใช้โครงสร้างนี้ผู้ออกแบบจึงต้องออกแบบวงจรภาคขยายสำหรับวงจร PTAT ที่อนุกรมกับความต้านทาน R แสดงดังรูปที่ 2.14 ก่อนที่จะนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงนำเสนอ วงจร PTAT โดยนำการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าแรงดันของรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์ที่มีค่ามากกว่า V_T มาใช้ในการเพิ่มผลตอบสนองระหว่างแรงดันต่ออุณหภูมิให้มากขึ้น และค่าของแรงดันตกคร่อมรอยต่อซีเนอร์ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่ามากกว่าวงจร PTAT แบบเดิม ทั้งนี้ยังคงนำเสนอการใช้ความต้านทาน R_{out} ในการวัดผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุตต่ออุณหภูมิ ดังนั้น R_{out} ควรเป็นค่าคงที่ที่ไม่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิหรือมีค่าที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอย่างเป็นเชิงเส้นมากที่สุด ด้วยเหตุนี้การกำหนดชนิดของ R_{out} จึงมีผลต่อวงจรไม่น้อย

หากทำการพิจารณาเป็นลำดับผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่งผลต่อกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับการไบแอสไปข้างหน้า สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ [21]

$$I = I_s \left(e^{\left(\frac{qV_d}{kT} \right)} - 1 \right) \quad (4.1)$$

เมื่อ V_d คือแรงดันคร่อมไดโอด, I คือ กระแสไดโอด, I_s คือกระแสอิ่มตัว (Saturation Current), q คือประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนหน่วยเป็นคูลอมบ์, k คือค่าคงที่ Boltzman และ T คือค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute Temperature) หน่วยเป็นเคลวิน

ถ้ากระแสไดโอด I มากกว่ากระแสอิ่มตัว I_s มาก ๆ ($I \gg I_s$) จะสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$V_d = T \left(\frac{k}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{I_s} \right) \quad (4.2)$$

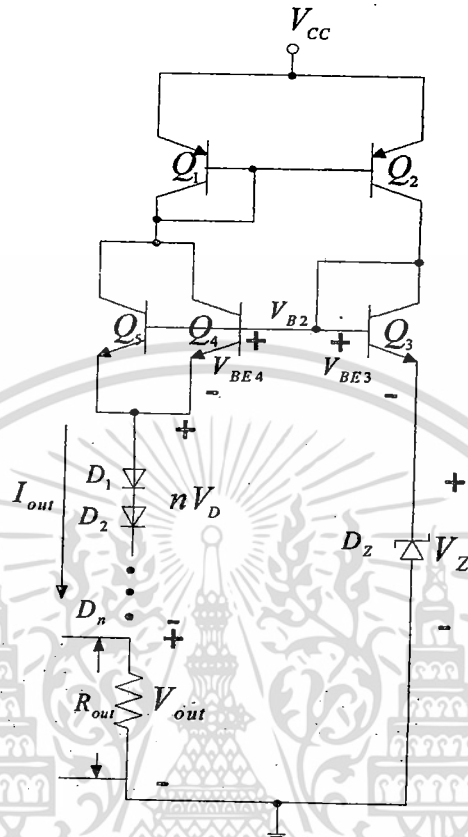
จากสมการที่ (4.2) กระแสอิ่มตัว I_s จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิอย่างมาก เมื่อเทียบกับกระแสไดโอด I ที่มีค่ามากกว่า ดังนั้นแรงดันคร่อมไดโอด V_d จึงเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ T อย่างเป็นเชิงเส้น (Linearity) และความเป็นเชิงเส้นจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อกระแสไดโอดมากกว่ากระแสอิ่มตัวมาก ๆ ($I \gg I_s$)

จากสมการที่ (4.2) หากทำการต่อไดโอดชนิดเดียวกันอนุกรม n ตัว จะทำให้ V_d เพิ่มขึ้นเป็น n เท่า ดังสมการที่ (4.3)

$$V_d = n \left[T \left(\frac{k}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{I_s} \right) \right] \quad (4.3)$$

และจะส่งผลให้ความชัน $\Delta V_d / \Delta T$ มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อรอยต่อซีเนอร์ในย่านไบอัสย้อนกลับ เป็นปรากฏการณ์เบรคดาวแบบอะวาลานซ์ (Avalanche Breakdown) โดยถูกต่ออยู่กับแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (PTAT) ซีเนอร์ไดโอดทำหน้าที่เป็นแรงดันอ้างอิง ช่วยทำให้วงจรมีเสถียรภาพและเป็นเชิงเส้นดียิ่งขึ้น

4.1 (ก) การออกแบบวงจร PTAT โดยใช้ผลของรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์



รูปที่ 4.1 วงจร โครงสร้างเซ็นเซอร์อุณหภูมิ PTAT โดยมีรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์

ตามรูปที่ 4.1 วงจร โครงสร้างเซ็นเซอร์อุณหภูมิ PTAT แบบโพล่าทรานซิสเตอร์ร่วมกับ รอยต่อซีเนอร์และอนุกรมรอยต่อพี-เอ็น ให้แรงดันเอาต์พุตมีความเป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิในช่วง ตั้งแต่ -60°C ถึง 160°C ซึ่งมีหลักการการทำงานที่สำคัญดังนี้

ไบโพล่าทรานซิสเตอร์ชนิด PNP Q_1 และ Q_2 จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Current Constant) ให้กับวงจร โดยที่ขาอิมิตเตอร์ ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับ แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง V_{CC} ส่วนขาเบสของทรานซิสเตอร์ทั้งสองจะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันที่ขา คอลเลกเตอร์ (Collector) ของทรานซิสเตอร์ชนิด PNP Q_2 และ NPN Q_3 จะถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน โดยที่ทรานซิสเตอร์ Q_3 จะทำหน้าที่ขับทรานซิสเตอร์ NPN Q_4 และ Q_5 ซึ่งต่อขนานกันให้ สามารถทำงานได้ โดยที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q_3 , Q_4 และ Q_5 จะถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน และได้รับกระแสมาจากขาคอลเลกเตอร์ของ Q_2 ส่วนขาคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_4 และ Q_5 จะถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันซึ่งจะรับกระแสมาจากขาคอลเลกเตอร์ของ Q_1 ดังนั้นจึงทำให้เกิดกระแสเอาต์พุต I_{out} ซึ่งเป็นกระแสอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_4 และ Q_5 ขึ้น โดยกระแส เอาต์พุตนี้จะไหลผ่านอนุกรมไดโอด D_1, D_2, \dots, D_n , n คือจำนวนของรอยต่อของรอยต่อพี-เอ็น อนุกรมกับ n ตัว โดย n เป็นเลขจำนวนเต็มบวก 1, 2, 3, \dots และไหลผ่านตัวต้านทาน R_{out} ลง

กราวด์ เกิดเป็นแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_{out} เป็นแรงดันเอาต์พุต (V_{out}) ขึ้น โดยแรงดันเอาต์พุตนี้จะขึ้นอยู่กับผลต่างของแรงดันตกคร่อมไดโอด D_1, D_2, \dots, D_n และรอยต่อซีเนอร์ D_z กับแรงดันตกคร่อมเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_3, Q_4 และ Q_5 ดังสมการที่ (4.4.1)

$$V_{OUT} = (V_Z - nV_D) + (V_{BE3} - V_{BE4,5}) \quad (4.4.1)$$

เมื่อ V_{OUT} คือ แรงดันเอาต์พุตจากวงจรเซ็นเซอร์อุณหภูมิ PTAT แบบโพล่าทรานซิสเตอร์

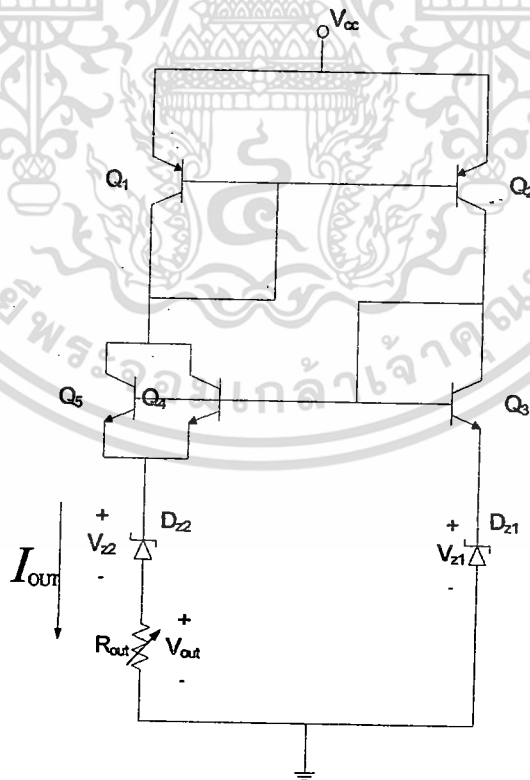
V_Z คือ แรงดันตกคร่อมรอยต่อซีเนอร์ D_z

nV_D คือ แรงดันตกคร่อมไดโอดอนุกรม D_1, D_2, \dots, D_n จำนวน n ตัว โดย n เป็นเลขจำนวนเต็มบวก 1, 2, 3, ..., n

V_{BE3} คือ แรงดันตกคร่อมเบสและอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_3

$V_{BE4,5}$ คือ แรงดันตกคร่อมเบสและอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_4 และ Q_5

4.1 (ข) การออกแบบวงจร PTAT โดยใช้ผลของรอยต่อซีเนอร์และรอยต่อซีเนอร์



รูปที่ 4.2 วงจร โครงสร้างเซ็นเซอร์อุณหภูมิ PTAT โดยมีรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูปที่ 4.2 วงจรโครงสร้างเซ็นเซอร์อุณหภูมิ PTAT แบบโพล่าทรานซิสเตอร์ร่วมกับรอยต่อซีเนอร์ D_{Z2} กับรอยต่อซีเนอร์ D_{Z1} ให้แรงดันเอาต์พุตมีความเป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิในช่วงตั้งแต่ $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีหลักการการทำงานที่สำคัญดังนี้

การทำงานในส่วนของวงจร PTAT แบบโพล่าทรานซิสเตอร์ทำงานในลักษณะเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.1.1 แต่จะแตกต่างกันในส่วนของกระแสเอาต์พุต I_{out} จะไหลผ่านรอยต่อซีเนอร์แต่ละเบอร์ที่นำมาออกแบบและไหลผ่านตัวต้านทาน R_{out} ลงกราวด์ เกิดเป็นแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_{out} เป็นแรงดันเอาต์พุต (V_{out}) ขึ้น โดยแรงดันเอาต์พุตนี้จะขึ้นอยู่กับผลต่างของแรงดันตกคร่อมรอยต่อซีเนอร์ D_{Z2} และรอยต่อซีเนอร์ D_{Z1} กับแรงดันตกคร่อมเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_3, Q_4 และ Q_5 ดังสมการที่(4.4.2)

$$V_{OUT} = (V_{Z1} - V_{Z2}) + (V_{BE3} - V_{BE4}) \quad (4.4.2)$$

เมื่อ V_{OUT} คือ แรงดันเอาต์พุตจากวงจรเซ็นเซอร์อุณหภูมิ PTAT แบบโพล่าทรานซิสเตอร์

V_{Z1} คือ แรงดันตกคร่อมรอยต่อซีเนอร์ D_{Z1}

V_{Z2} คือ แรงดันตกคร่อมรอยต่อซีเนอร์ D_{Z2}

V_{BE3} คือ แรงดันตกคร่อมเบสและอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_3

$V_{BE4,5}$ คือ แรงดันตกคร่อมเบสและอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_4 และ Q_5

จากสมการความสัมพันธ์กระแสและแรงดันของไดโอดดังสมการที่ (4.3) และสมการแรงดันเอาต์พุตสมการที่ (4.4.1) มาเขียนเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตต่ออุณหภูมิใหม่ได้ดังนี้

$$V_{OUT} = V_{DZ} (T - T_0) - n \left[(T - T_0) \left(\frac{k}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{I_s} \right) \right] + (T - T_0) \left(\frac{k}{q} \right) \ln r \quad (4.5)$$

และ

$$\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(out)} = \left(\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(PTAT)} + \left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(DZ)} \right) - n \left(\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(P-Ndiode)} \right) \quad (4.6.1)$$

จากสมการแรงดันเอาต์พุตสมการที่(4.4.2) มาเขียนเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตต่ออุณหภูมิใหม่ได้ดังนี้

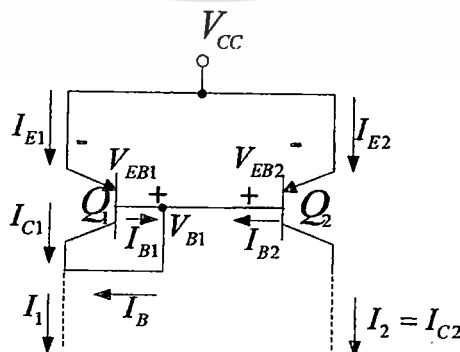
$$\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(OUT)} = \left(\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(PTAT)} + \left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(Dz1)} \right) - \left(\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(Dz2)} \right) \quad (4.6.2)$$

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของเซนเซอร์อุณหภูมิวัดอุณหภูมิโดยใช้โครงสร้างของวงจร PTAT ก่อนและหลังการนำความสัมพันธ์ของรอยต่อซีเนอร์และพี-เอ็นมาใช้ โดยทั้งนี้กำหนดให้ $I_{C1} = I_{C2}$

ความสัมพันธ์ของสมการ	ก่อน	หลัง
แรงดันเอาต์พุต	$V_{out} = V_T \ln(r)$	$V_{OUT} = V_{DZ} - n \left[T \left(\frac{k}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{I_s} \right) \right] + T \left(\frac{k}{q} \right) \ln r$
$\Delta V / \Delta T$	$\frac{\Delta(V_{be1} - V_{be2})}{\Delta T(T_1 - T_0)} = \frac{k(T_1 - T_0)}{q} \ln(r)$	$V_{OUT} = (T_1 - T_0) V_{DZ} - n \left[(T_1 - T_0) \left(\frac{k}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{I_s} \right) \right] + (T_1 - T_0) \left(\frac{k}{q} \right) \ln r$

จากการเปรียบเทียบของตารางที่ 4.2 เป็นผลให้วงจรหลังจากเพิ่ม โครงสร้างของรอยต่อซีเนอร์และรอยต่อพี-เอ็น มีแรงดันเอาต์พุตที่มากขึ้นและอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตต่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และยังคงความเป็นเชิงเส้นของวงจร PTAT ที่เป็นลักษณะเด่นของวงจร PTAT ไว้ได้

4.1.1 การหาความสัมพันธ์ของกระแส I_1, I_2, I_3 และ I_4



จากความสัมพันธ์ของแรงดันตกคร่อมเบส-อิมิตเตอร์ ของทรานซิสเตอร์ไบโพล่าร์ชนิด PNP [] และกระแส I_E สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 4.7

$$V_{EB} = V_T \ln \frac{I_E}{I_S} \quad (4.7)$$

$$\frac{V_{EB}}{V_T} = \ln \frac{I_E}{I_S} \quad (4.8)$$

$$I_E = I_S e^{\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right)} \quad (4.9)$$

และจากสมการที่ (4.9) สามารถอธิบายผลของกระแส I_{E1} และ I_{E2} ในรูปที่ 4.3 ได้ดังนี้

$$I_{E1} = I_{S1} e^{\left(\frac{V_{EB1}}{V_{T1}}\right)} \text{ และ } I_{E2} = I_{S2} e^{\left(\frac{V_{EB2}}{V_{T2}}\right)} \quad (4.10)$$

และเนื่องจาก Q_1 และ Q_2 ถูกกำหนดให้สร้างในสถานะเงื่อนไขและสถานะอากาศเดียวกัน ทำให้ $I_{S1} = I_{S2}$, $V_{EB1} = V_{EB2}$ และ $V_{T1} = V_{T2}$ เป็นผลให้กระแส I_{E1} และ I_{E2} เป็นดังสมการที่ (4.11)

$$I_{E1} = I_{E2} \quad (4.11)$$

จากการระบุเงื่อนไขของทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในย่านแอกทีฟ (Active mode) [4, 21] กำหนดให้ $I_{C1} = \alpha_1 I_{E1}$ และ $I_{C2} = \alpha_2 I_{E2}$ แต่เนื่องจาก Q_1 และ Q_2 ถูกกำหนดให้สร้างในสถานะเงื่อนไขเดียวกันทำให้ $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ ดังนั้น $I_{C1} = \alpha I_{E1}$ และ $I_{C2} = \alpha I_{E2}$ และจากความสัมพันธ์นี้ ทำให้กระแส I_{C1} และ I_{C2} มีค่าดังสมการที่ (4.12)

$$I_{C1} = I_{C2} \quad (4.12)$$

จากสมการที่ (4.11) และ (4.12) สรุปได้ว่าในรูปที่ 4.3 Q_1 และ Q_2 ทำงานในสถานะเงื่อนไขเดียวและสถานะอากาศเดียวกันทั้งหมดจะทำให้

$$I_{E1} = I_{E2} \text{ และ } I_{C1} = I_{C2} \quad (4.13)$$

ดังนั้นผลของ I_{C1} และ I_{C2} ที่ได้จากสมการ (4.13) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_1 และ I_2 ได้ดังสมการที่ (4.14) และ สมการที่ (4.16)

$$I_1 = I_{C1} + I_B \quad (4.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดย $I_B = I_{B1} + I_{B2}$ ดังนั้น

ไม่มีการแก้ไขที่ใด ๆ ที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_1 = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} \quad (4.15)$$

และ

$$I_2 = I_{C2} = \beta_2 I_{B2} \quad (4.16)$$

โดยที่ $I_{C1} = \beta_1 I_{B1}$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$I_1 = I_{C1} + \frac{I_{C1}}{\beta_1} + \frac{I_{C2}}{\beta_2} \quad (4.17)$$

และ

$$I_1 = \left(1 + \frac{1}{\beta_1}\right) I_{C1} + \frac{I_{C2}}{\beta_2} \quad (4.18)$$

ดังนั้นเราสามารถนำความสัมพันธ์ของสมการ(4.16) และสมการ (4.18) สามารถนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง I_1 และ I_2 ได้ดังสมการ (4.19)

$$I_1 = \left(1 + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2}\right) I_2 \quad (4.19)$$

ถ้ากำหนดให้สมการ 4.19 มีค่า $\beta_1 = \beta_2 = 100$ จะ ได้ดังสมการที่ (4.20)

$$I_1 = 0.98 I_2 \quad (4.20)$$

แต่เนื่องจาก 0.98 มีค่าใกล้เคียง 1 ดังนั้นจึงสามารถประมาณได้ว่า

$$I_1 = I_2 \quad (4.21)$$

ดังนั้นจากรูปที่ 4.3 สามารถสรุปได้ว่ากระแส $I_1 = I_2$ ได้ก็ต่อเมื่อ β มีค่ามากและ Q_1 และ Q_2 ทำงานในสภาวะเงื่อนไขเดียวและสภาวะอากาศเดียวกัน

$$\left(1 + \frac{1}{\beta_3}\right) I_{C3} = I_2 - \frac{I_1}{2\beta} \quad (4.26)$$

หรือ

$$\left(\frac{1 + \beta_3}{\beta_3}\right) I_{C3} = I_2 - \frac{I_1}{2\beta} \quad (4.27)$$

รูปที่ 4.4 กำหนดให้ $I_{E3} = I_3$ เป็นผลให้ $I_{C3} = \alpha I_{E3}$ และ $\alpha_3 = \frac{\beta_3}{\beta_3 + 1}$ จากเงื่อนไขที่ได้แทนในสมการที่ 4.27 ได้ดังสมการที่ 4.28 และ 4.29

$$\left(\frac{1 + \beta_3}{\beta_3}\right) \left(\frac{\beta_3}{\beta_3 + 1}\right) I_{E3} = I_2 - \frac{I_1}{2\beta} \quad (4.28)$$

และ

$$\left(\frac{1 + \beta_3}{\beta_3}\right) \left(\frac{\beta_3}{\beta_3 + 1}\right) I_3 = I_2 - \frac{I_1}{2\beta} \quad (4.29)$$

ดังนั้น

$$I_3 = I_2 - \frac{I_1}{2\beta} \quad (4.30)$$

จากสมการที่ (4.30) ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_3 และ I_4 โดยกำหนดให้ $I_4 = I_1$ (กำหนดเพื่อลดความยุ่งยากของสมการ เนื่องจากความเป็นจริง $I_1 = I_{C4,5}$ จากรูปที่ 4.4 ดังนั้น $I_{C4,5} = \alpha_{4,5} I_E$ แต่เนื่องจากผลของ $\alpha_{4,5}$ มีค่าประมาณ ≈ 1) จากการประมาณดังกล่าว เมื่อนำมาแทนในสมการที่ (4.19) และ (4.30) สามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้

$$I_3 = \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2}} - \frac{1}{2\beta} \right) I_4$$

ดังนั้นหาก $\beta_1 = \beta_2 = \beta = 100$

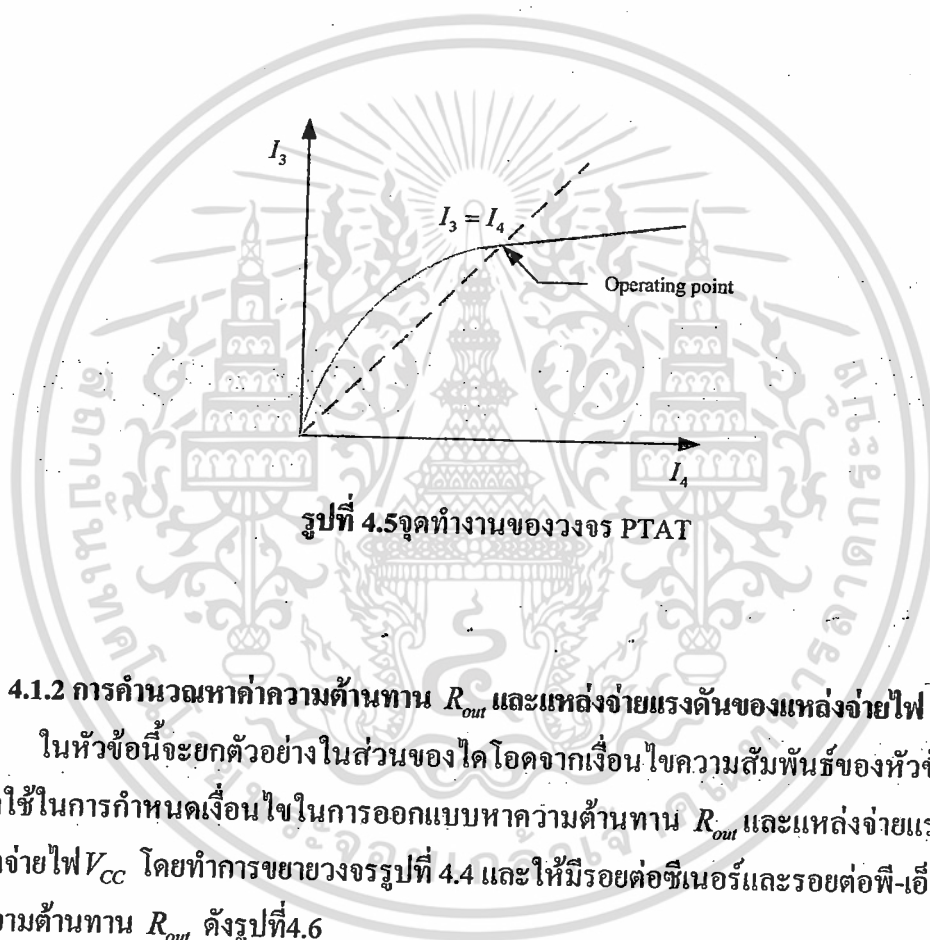
$$I_3 = 0.98 I_4 \quad (4.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์นี้อาจประมาณได้ว่า $I_3 = I_4$ เนื่องจาก 0.98 มีค่าเข้าใกล้ 1 แต่ทั้งนี้ต้องอยู่ในเงื่อนไขที่ว่า β มีค่ามากและ Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 และ Q_5 สร้างโดยเงื่อนไขและสภาพบรรยากาศเดียวกัน จึงจะสามารถกำหนดจุดทำงานให้กับวงจรในรูปที่ 4.4 ได้ว่า

$$I_3 = I_4 \quad (4.32)$$

จากสมการที่กล่าวมาเบื้องต้น ทำให้วงจรนี้มีจุดทำงาน(operating point) อยู่ 2 จุดคือ $(0,0)$ และ $(I_3 = I_4)$



4.1.2 การกำหนดค่าความต้านทาน R_{out} และแหล่งจ่ายแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ V_{CC}

ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างในส่วนของไดโอดจากเงื่อนไขความสัมพันธ์ของหัวข้อที่ 4.1.1 นำมาใช้ในการกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบหาความต้านทาน R_{out} และแหล่งจ่ายแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ V_{CC} โดยทำการขยายวงจรรูปที่ 4.4 และให้มีรอยต่อซีเนอร์และรอยต่อพี-เอ็นอนุกรมกับความต้านทาน R_{out} ดังรูปที่ 4.6

กำหนดกระแส $I_3 = I_4 = 20mA$ เพื่อให้สอดคล้องกับการนำไปใช้จึงกำหนดให้ซีเนอร์ไดโอดมีแรงดันพังทลาย $V_Z = 5.1V$ ที่กระแส $20mA$ (ตาม datasheet ของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N5231) และกำหนดให้ Q_3, Q_4 และ Q_5 ใช้เบอร์ 2N3904 $V_{EB1} = V_{EB2} = V_{BE4} = 0.9V$ และ $V_{BE3} = 0.92V$ ซึ่งค่าที่ได้นำมาจากการจำลองการทำงาน (simulation) โดยโปรแกรม PSpice ในที่นี้ทำการกำหนด $V_Z = 5.1V$ ใช้เบอร์ 1N5231 และ $V_D \approx 0.88V$ (ตาม datasheet ของไดโอดเบอร์ 1N4152) จากข้อมูลดังกล่าวนำมาแทนในสมการที่ (4.35) ได้ค่า

$$R_{OUT} = \frac{4.24V}{20mA}$$

$$R_{OUT} = 212\Omega$$

และจากรูปที่ 4.6 สามารถหาค่าแหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} ได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.32) ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของแรงดัน V_{CC} ดังสมการที่ (4.35)

$$V_{CC} = V_{BE1} + V_{BE4} + nV_D + V_{out} \quad \text{หรือ} \quad V_{CC} = V_{EB2} + V_{BE3} + V_Z \quad (4.35)$$

ดังนั้นเมื่อใช้ข้อมูลเดียวกับการหาค่าตัวแปร R_{out} จะสามารถหาค่า V_{CC} ได้เท่ากับ $6.92V$

จากรูปที่ 4.6 กำหนดให้ $n = 1, V_D = 0.88V, V_Z = 5.1V, V_{BE3} = 0.92V, V_{CC} = 6.92V, V_{EB1} = V_{EB2} = V_{BE4} = 0.9V$ และ $R_{OUT} = 212\Omega$ จะได้กระแส $I_3 = I_4 = 20mA$ ในอุณหภูมิห้อง

4.1.3 หาอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่ออุณหภูมิ

หัวข้อที่ 4.1.3 ใช้เงื่อนไขการวิเคราะห์เช่นเดียวหัวข้อที่ 4.1.2 กำหนดให้ Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 และ Q_5 สร้างโดยเงื่อนไขและทำงานในสภาพบรรยากาศเดียวกันจากสมการที่ (4.1.4) นำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันต่ออุณหภูมิได้ดังสมการที่ (4.36)

$$V_{out} = \frac{kT_3}{q} \ln \frac{I_3}{I_{S3}} - \frac{kT_4}{q} \ln \frac{I_4}{I_{S4}} - n \frac{kT_D}{q} \ln \frac{I_D}{I_{SD}} + V_Z T_Z \quad (4.36)$$

กำหนดให้ $T_3 = T_4 = T_D = T_Z = T$ เนื่องจากทำงานในสภาวะอากาศเดียวกัน และ $I_{S4} = 2I_{S3}$ เนื่องจากผลของทรานซิสเตอร์ Q_3, Q_4 และ Q_5 สร้างในเงื่อนไขและชนิดเดียวกันนำข้อกำหนดที่ได้แทนในสมการที่ (4.36) ได้ดังสมการที่ (4.37)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้ในการวิจัยและการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{out} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_3}{I_4} - n \frac{kT}{q} \ln \frac{I_D}{I_{SD}} + V_Z T \quad (4.37)$$

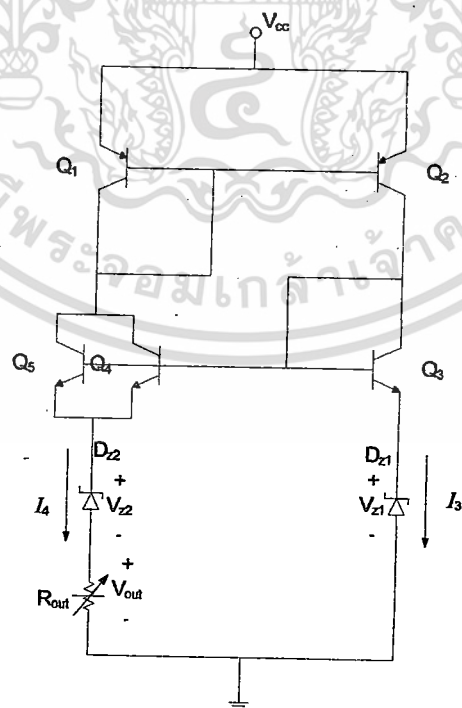
แทนความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.32 ลงในสมการ 4.37 ได้ดังสมการที่ 4.38

$$V_{out} = \frac{kT}{q} \ln 2 - n \frac{kT_D}{q} \ln \frac{I_D}{I_{SD}} + V_Z T \quad (4.38)$$

หรือนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่ออุณหภูมิได้ดังนี้

$$\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(out)} = \left(\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(PTAT)} + \left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(DZ)} \right) - n \left(\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(D)} \right) \quad (4.39)$$

ในส่วนขอรอยต่อซีเนอร์กับรอยต่อซีเนอร์สำหรับการหาค่า R_{out} ก็ทำเช่นเดียวกันกับกรณีของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นได้จากการKVL ที่ L_1 จากรูปที่ 4.6.2



รูปที่ 4.6.2 วงจร PTAT ที่มีซีเนอร์และรอยต่อซีเนอร์อนุกรมกับความต้านทาน R_{out}

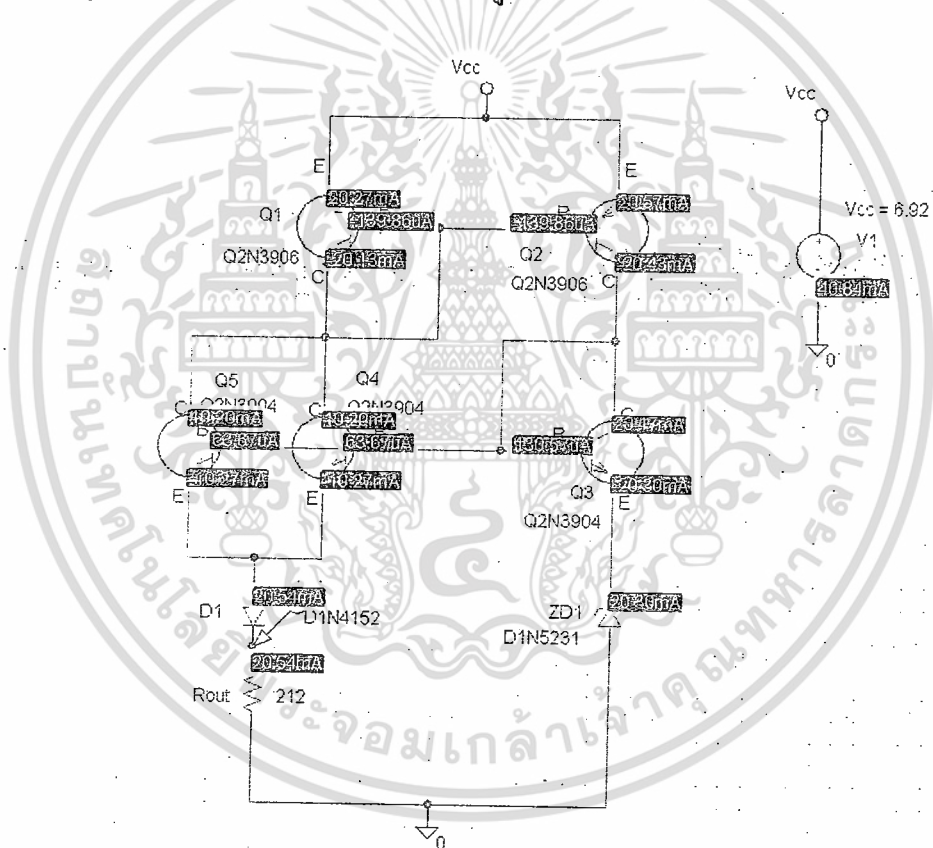
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การใช้โปรแกรม PSpice ในการออกแบบวงจร PTAT โดยแบบมีซีเนอร์ไดโอด

จากข้อมูลและค่าที่ได้ในหัวข้อที่ 4.1.2 ใช้กำหนดเงื่อนไขในการออกแบบวงจรรูปที่ 4.6.1 โดยใช้โปรแกรม Pspice ในการจำลองการทำงานโดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

4.2.1 การสร้างวงจรด้วยและจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice

สร้างวงจรตามรูปที่ 4.7 โดยกำหนดเงื่อนไขให้ $V_{CC} = 6.92 \text{ V}$, $R_{OUT} = 212\Omega$ จากหัวข้อที่ 4.1.2 เพื่อหากระแส $I_3 = I_4 = 20 \text{ mA}$ จากสมการที่ 4.32 โดยกำหนดให้ Q_1 และ Q_2 ใช้เบอร์ 2N3906 Q_3, Q_4 และ Q_5 ใช้เบอร์ 2N3904 $n = 1$ $D1 = 1N4152$ และ $Dz = 1N5231$ ที่อุณหภูมิห้อง หรือที่ 27°C โดยผลที่ได้ดังรูปที่ 4.7



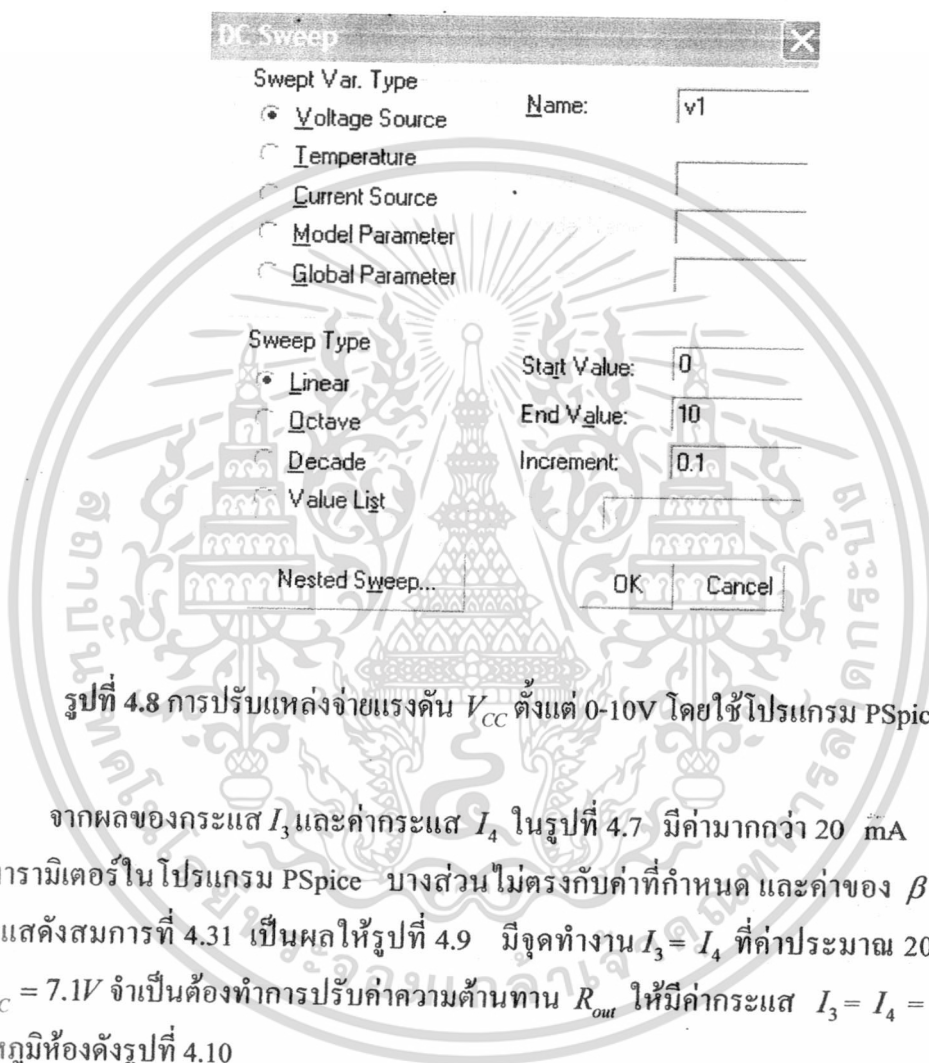
รูปที่ 4.7 จำลองการทำงานของวงจร PTAT ที่ซีเนอร์ไดโอดมีค่า $V_z = 5.1 \text{ V}$

จากผลที่ได้ในรูปที่ 3.6 หลังจากจำลองการทำงาน (simulation) กระแส $I_3 = 20.30 \text{ mA}$ และ $I_4 = 20.54 \text{ mA}$ จากเงื่อนไขรูปที่ 4.7 เมื่อนำมาหาอัตราส่วนของ $I_3/I_4 = 0.988$ ค่าที่ได้ นำมาเปรียบเทียบกับสมการที่ (4.31) มีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นสรุปได้ว่าเงื่อนไขของสมการที่ 4.31 เป็นจริง และเงื่อนไขในการหาค่า V_{CC} และ R_{out} ในสมการที่ (4.35) และสมการที่ (4.36) เป็นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

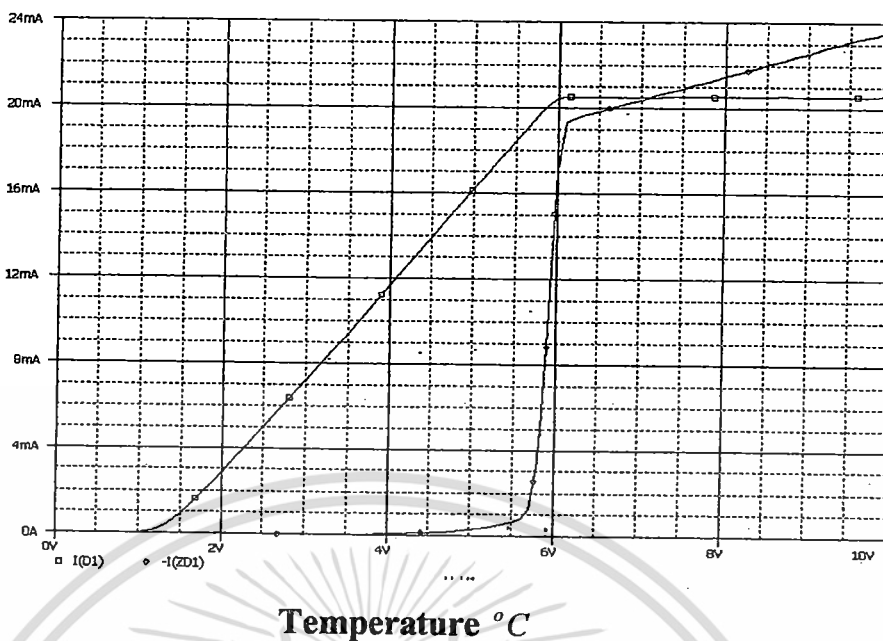
4.2.2 การหาความต้านทาน R_{out} , V_{CC} และจุดทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม Pspice[6]

หาจุดทำงานของวงจรรูปที่ 4.7 โดยใช้โหมด DC sweep ของโปรแกรม Pspice เพื่อตรวจสอบผลการทำงาน (Operating point) ของวงจรรูปที่ 4.7 โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดัน $V_1 = 0$ ถึง 10 โวลต์ ความละเอียด (Increment) = 0.1 ดังรูปที่ 4.8

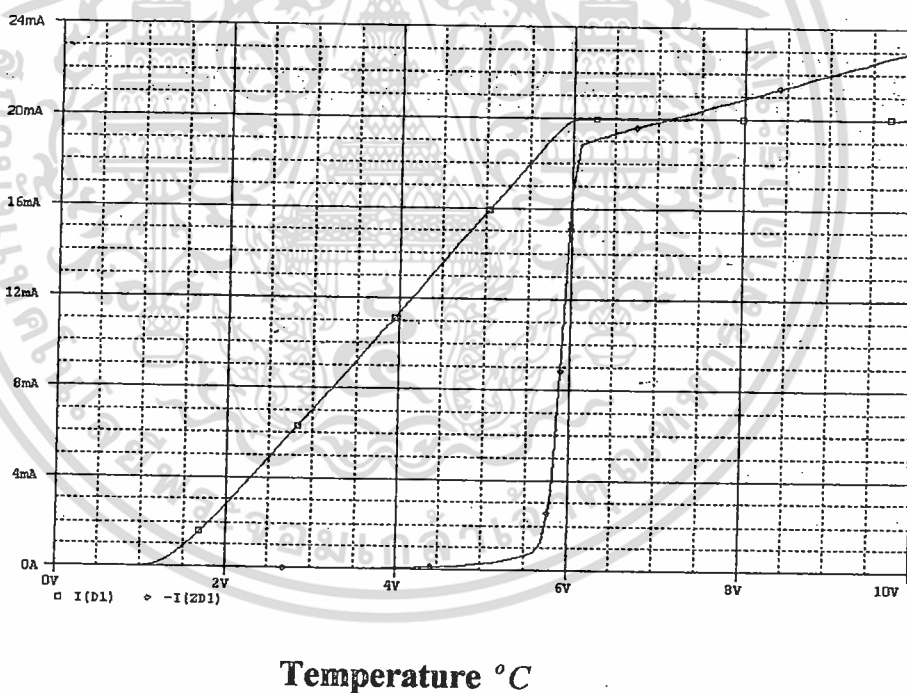


รูปที่ 4.8 การปรับแหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} ตั้งแต่ 0-10V โดยใช้โปรแกรม PSpice

จากผลของกระแส I_3 และค่ากระแส I_4 ในรูปที่ 4.7 มีค่ามากกว่า 20 mA เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ในโปรแกรม PSpice บางส่วนไม่ตรงกับค่าที่กำหนด และค่าของ β ที่มีผลต่อกระแสดังสมการที่ 4.31 เป็นผลให้รูปที่ 4.9 มีจุดทำงาน $I_3 = I_4$ ที่ค่าประมาณ 20.5mA ที่ $V_{CC} = 7.1V$ จำเป็นต้องทำการปรับค่าความต้านทาน R_{out} ให้มีค่ากระแส $I_3 = I_4 = 20$ mA ที่อุณหภูมิห้องดังรูปที่ 4.10



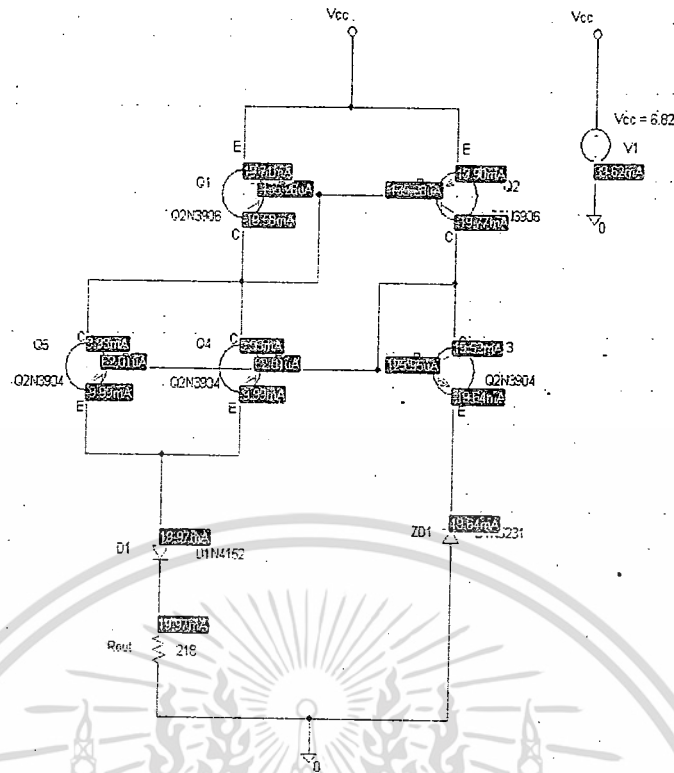
รูปที่ 4.9 จุดทำงานของวงจรที่ 3.6 โดยกระแส $I_3 = I_4 < 20 \text{ mA}$



รูปที่ 4.10 จุดทำงานของวงจรที่ 3.6 โดยกระแส $I_3 = I_4 = 20 \text{ mA}$

ผลจากรูปกราฟที่ 4.10 แสดงให้เห็นจุดทำงานของวงจรที่ 4.7 เมื่อทำการปรับค่าความต้านทาน $R_{OUT} = 218\Omega$ ที่แหล่งจ่ายแรงดัน $V_{CC} = 6.82\text{V}$ ในระดับอุณหภูมิห้องดังรูปที่ 4.11

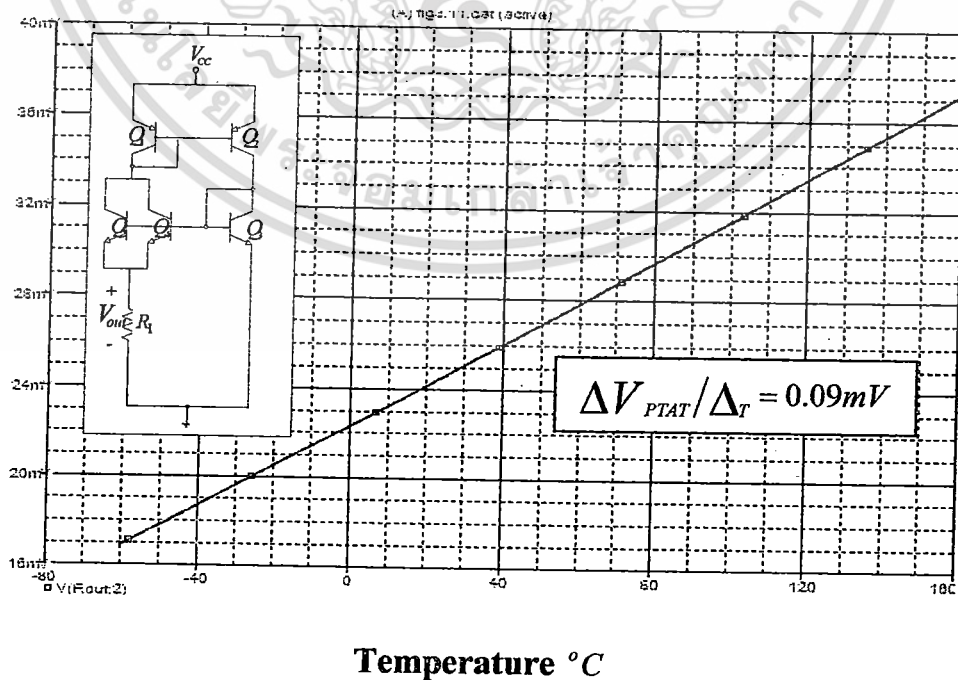
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



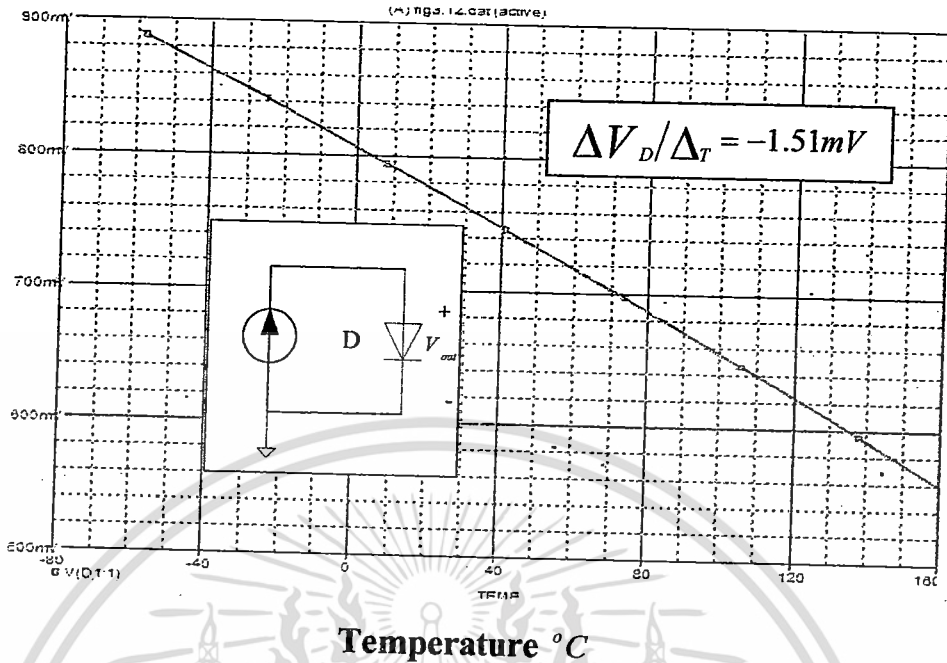
รูปที่ 4.11 จำลองการทำงานที่กระแส $I_3 \approx I_4 \approx 20mA$

4.2.3 การวัดผล $\Delta V_{out} / \Delta T$ วงจรโดยใช้โปรแกรม Pspice

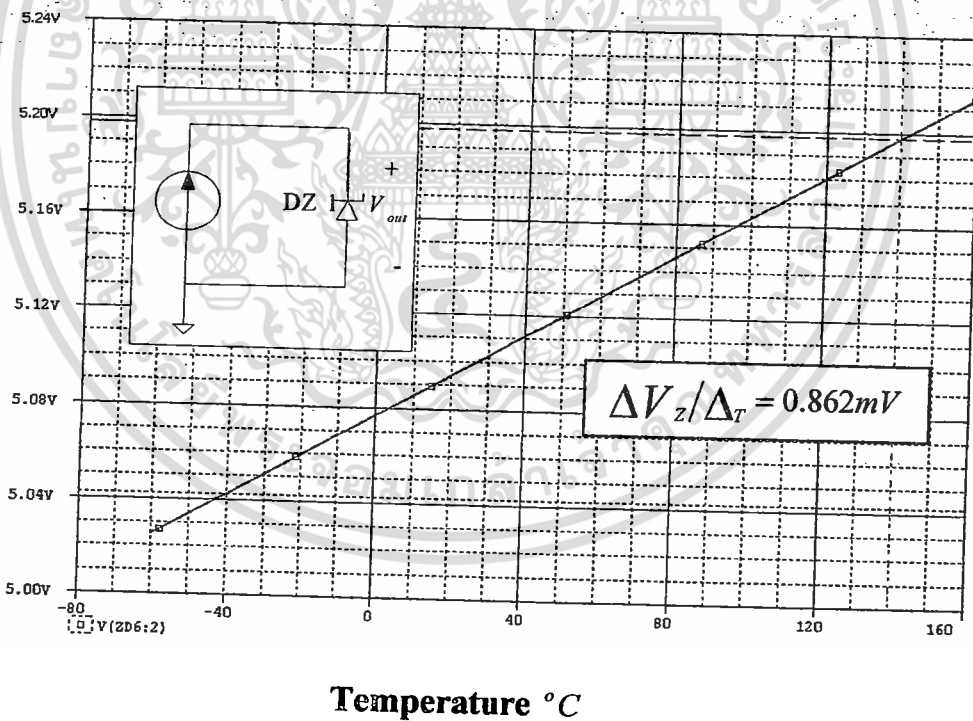
จากสมการที่ (3.39) ในหัวข้อที่ 4.1.3 นำมาใช้ในการหาผล $\Delta V_{out} / \Delta T$ ของวงจรรูปที่ 4.11 ได้โดยทำการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน $\Delta V_{PTAT} / \Delta T$ ดังรูปที่ 4.12 $\Delta V_D / \Delta T$ ดังรูปที่ 4.13 และ $\Delta V_Z / \Delta T$ ดังรูปที่ 4.14 โดยกำหนดให้ $D = 1N4152$ และ $D_2 = 1N5231$



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.12 ผลตอบสนองของแรงดัน $\Delta V_{PTAT} / \Delta T$ ต่ออุณหภูมิที่ $-60^{\circ}C$ ถึง $160^{\circ}C$ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองของแรงดัน $\Delta V_D / \Delta T$ ต่ออุณหภูมิที่ -60°C ถึง 160°C



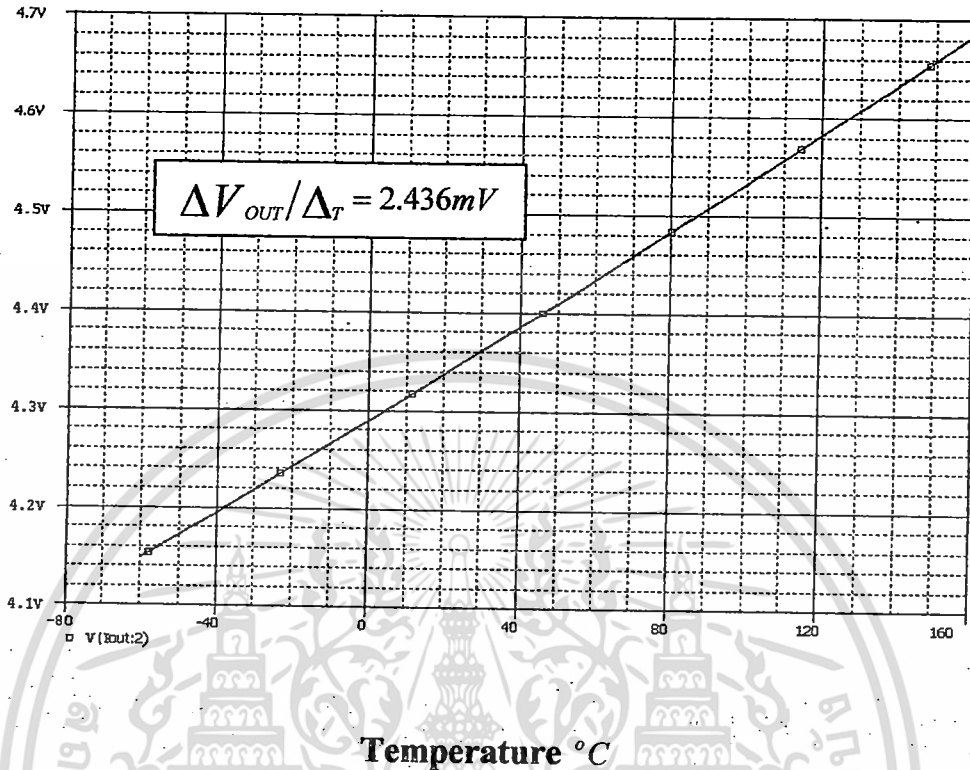
รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองของแรงดัน $\Delta V_z / \Delta T$ ต่ออุณหภูมิที่ -60°C ถึง 160°C

จากผลที่ได้ในรูปที่ 4.12-4.14 นำมาแทนในสมการที่ (3.39) ระหว่างอุณหภูมิที่ -60°C ถึง 160°C มีค่า $\Delta V_{out} / \Delta T = 2.462\text{mV}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการวัดผล $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากรูปที่ 4.11 โดยใช้ผลจากการจำลองการทำงานได้ดังรูปที่

4.15



รูปที่ 4.15 ผลตอบสนองของแรงดัน $\Delta V_{out} / \Delta T$ ต่ออุณหภูมิที่ -60°C ถึง 160°C

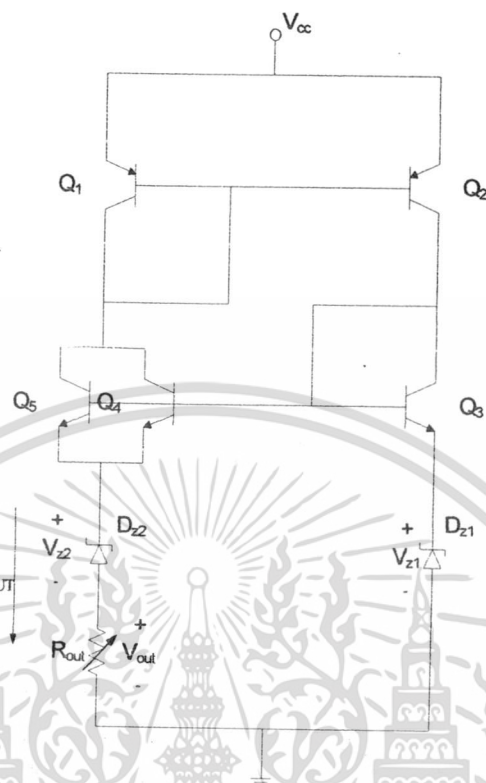
ผลที่ได้จากสมการที่ (3.39) และผลที่ได้จากการวัดในรูปที่ 3.10 ในรูปที่ 3.14 มีค่าใกล้เคียงกันมากดังนั้นจึงสรุปได้ว่า สมการที่ (3.39) เป็นจริง

4.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลต่อพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อพี-เอ็นกับซีเนออร์ และ วงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนออร์กับซีเนออร์

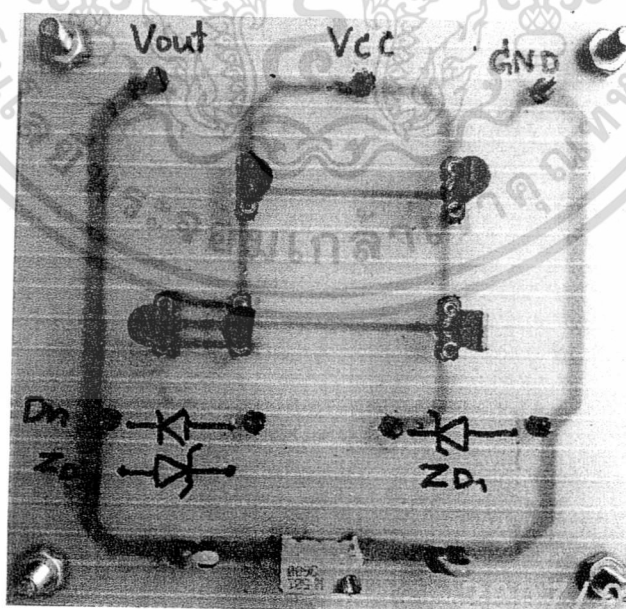
การศึกษาในหัวข้อที่ 4.3 มุ่งเน้นให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีผลต่อตัวแปรในการนำรอยต่อซีเนออร์กับรอยต่อพี-เอ็น และรอยต่อซีเนออร์กับซีเนออร์มาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจร PTAT เช่นรอยต่อซีเนออร์ รอยต่อพี-เอ็น ความต้านทานเอาต์พุต R_{out} และวงจร PTAT ที่อนุกรมกับ R_{out} หัวข้อนี้ทำการจำลองการทำงานในการหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่ออุณหภูมิ $\Delta V / \Delta T$ ของรอยต่อซีเนออร์และรอยต่อพี-เอ็น โดยใช้โปรแกรม Pspice รวมถึงผลที่ได้จากการทดสอบจริง โดยการทดลองนี้ได้นำชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิสำหรับวัด

คุณสมบัติที่ขึ้นกับอุณหภูมิในบทที่ 3 มาใช้ในการหาค่าคุณสมบัติของรอยต่อทั้งสองรวมถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานของ R_{out} และวงจร PTAT ที่อนุกรมกับ R_{out} ทำให้เห็นถึงข้อจำกัดในการทดสอบในหัวข้อที่ 4.4 ต่อไป การทดลองครั้งนี้ทดสอบในช่วงอุณหภูมิที่ -60°C ถึง 160°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเป็นเจ้าของโดยบุคคลอื่น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารถือว่าผิดกฎหมาย

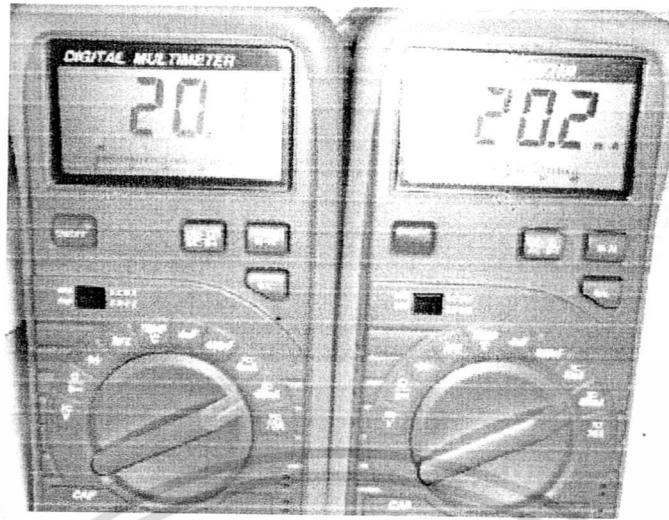


รูปที่ 4.16(ข) บล็อกไดอะแกรมและวงจร PTAT ด้วยไดโอดแบบรอยต่อซีเนอร์

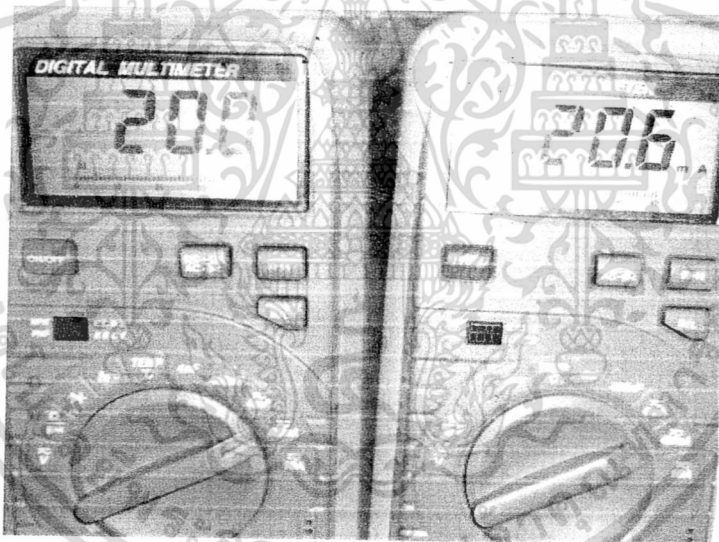


รูปที่ 4.17 วงจรที่ใช้ทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิของรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



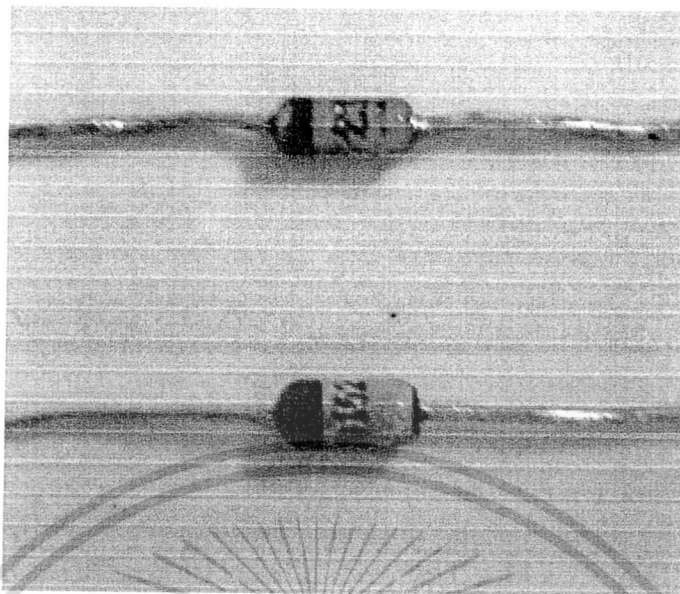
รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายผลของกระแส $I_3 = 20.2\text{mA}$, $I_4 = 20.1\text{mA}$ จากการวัดโดยใช้มัลติมิเตอร์ของรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์



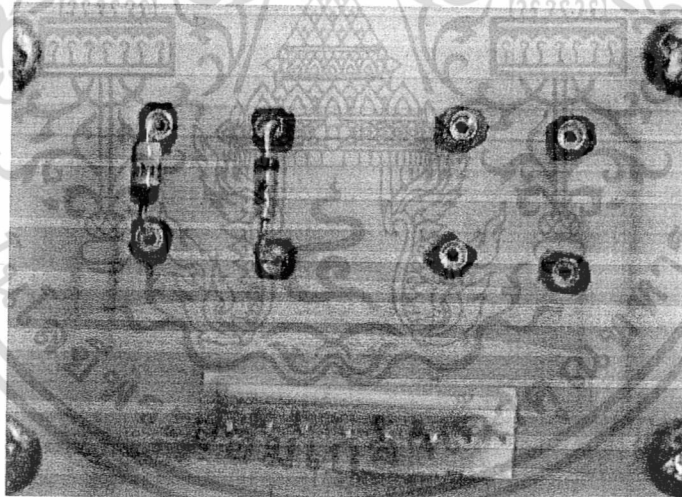
รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายผลของกระแส $I_3 = 20.6\text{mA}$, $I_4 = 20.0\text{mA}$ จากการวัดโดยใช้มัลติมิเตอร์ของรอยต่อซีเนอร์กับซีเนอร์

ในหัวข้อที่ 4.3.5 และ 4.3.6 จะนำหัววัดรอยต่อพี-เอ็นและหัววัดรอยต่อซีเนอร์ในรูปที่ 4.20 จะถูกนำมาทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยใส่หัววัดลงในลวดวงจรที่ได้ออกแบบไว้ และต่อสายสัญญาณผ่าน Connector ดังรูปที่ 4.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ตัวอย่างหัววัดรอยต่อพี-เอ็น เบอร์ 1N4152 และหัววัดรอยต่อซีเนอร์เบอร์ 1N5231

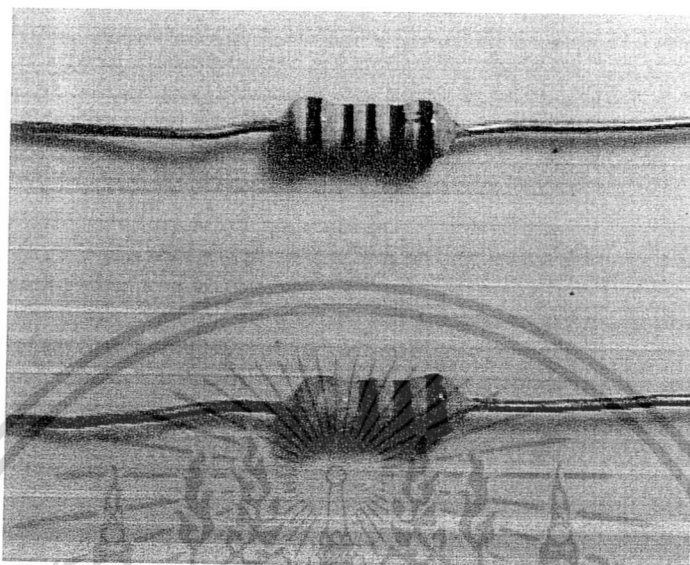


รูปที่ 4.21 ตัวอย่างหัววัดของรอยต่อพี-เอ็นและหัววัดรอยต่อซีเนอร์ที่พร้อมจะทำการทดลอง

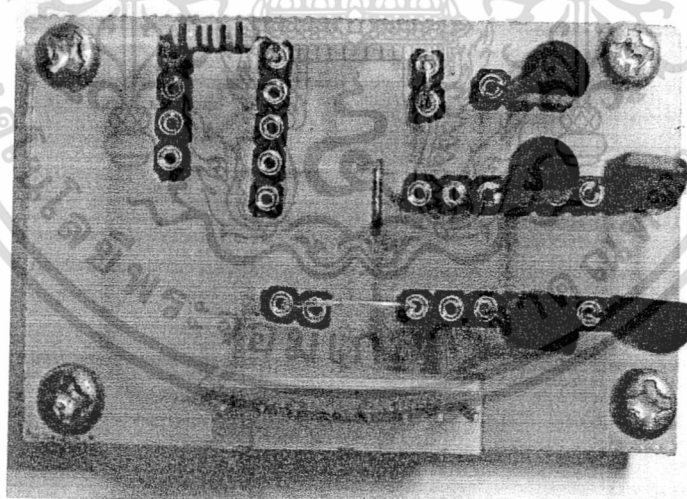
โดยการทดลองจะนำหัววัดทั้งสองมาบรรจุไว้ภายในชุดกำเนิดอุณหภูมิในหัวข้อที่ 3.1 ซึ่งวิธีการทดลองเหมือนกับหัวข้อที่ 3.3.1

ในหัวข้อที่ 4.3.7 และ 4.3.8 นำความต้านทาน R_{out} และวงจร PTATอนุกรมกับความต้านทาน R_{out} เพื่อหาคุณสมบัติที่ขึ้นกับอุณหภูมิเพื่อหาข้อจำกัดของวงจร PTAT ด้วยไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นในหัวข้อที่ 4.4 โดยชนิดของความต้านทาน R_{out} ในรูปที่ 4.22 และวงจร PTAT แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุกรมกับความต้านทาน R_{out} ในรูปที่ 4.23 จะถูกนำมาทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยใส่ลงในสายวงจรที่ได้ออกแบบไว้ และต่อสายสัญญาณผ่าน Connector ดังรูปที่ 4.24 และ รูปที่ 4.25

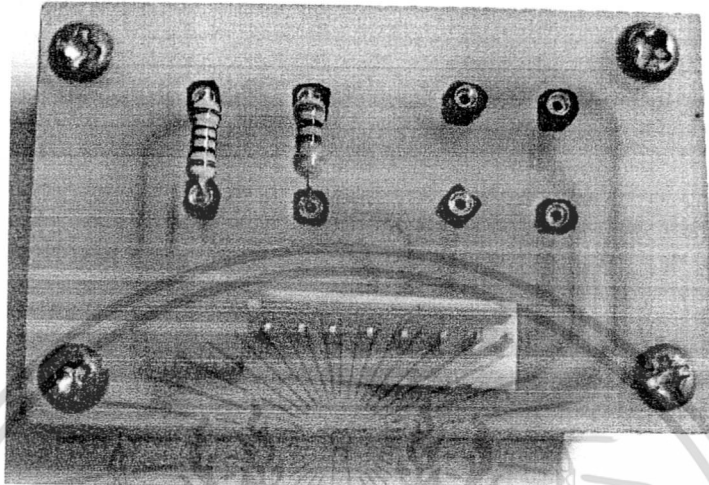


รูปที่ 4.22 ตัวอย่างตัวต้านทาน R_{out}

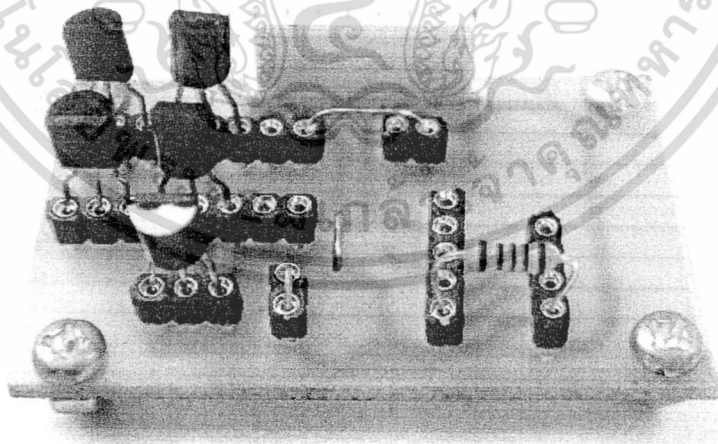


รูปที่ 4.23 วงจร PTATอนุกรมกับความต้านทาน R_{out} ที่ใช้ทดสอบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ตัวอย่างตัวต้านทาน R_{out} ที่พร้อมจะทดสอบ

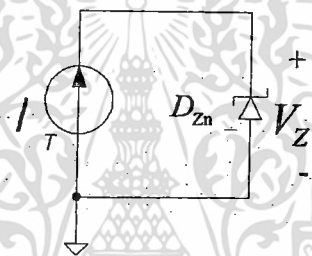


รูปที่ 4.25 วงจร PTATอนุกรมกับความต้านทาน R_{out} ที่พร้อมจะทดสอบ

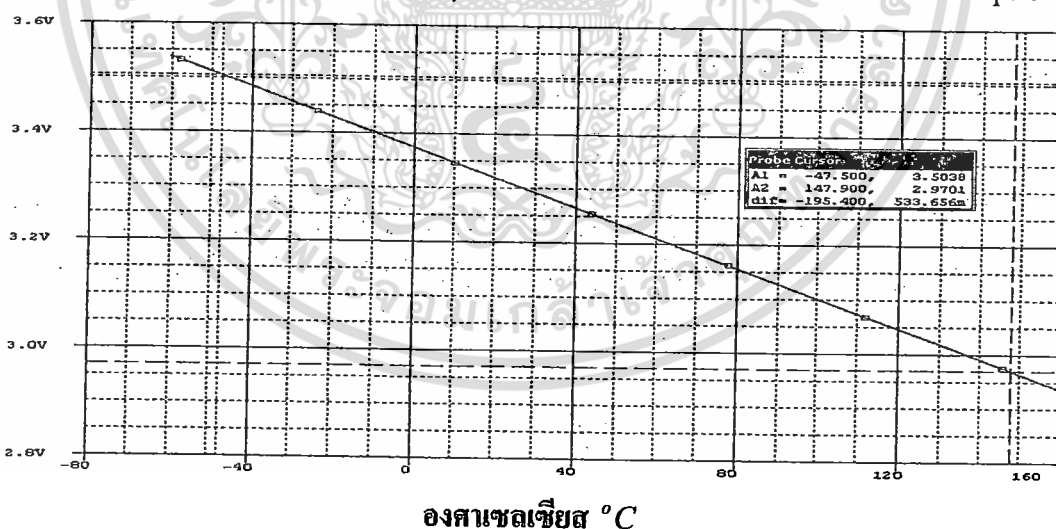
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ส่งผลต่อแรงดันพังทลาย (V_Z) ที่ต่างระดับกันของรอยต่อซีเนอร์โดยใช้โปรแกรม PSpice

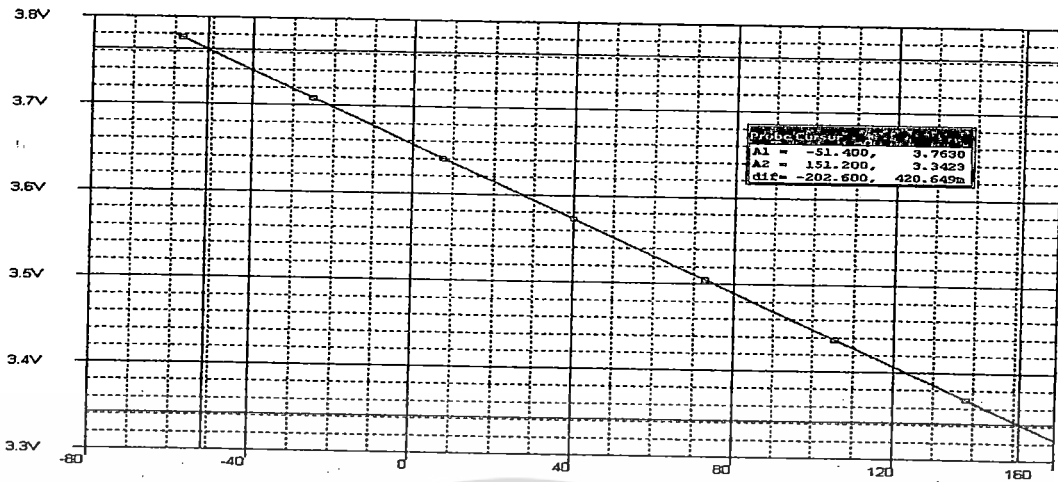
ในขั้นตอนแรกได้นำโปรแกรม PSpice มาใช้ในการจำลองการทำงานของซีเนอร์ไดโอดทางด้านไบอัสย้อนกลับ เพื่อศึกษาผลตอบสนองระหว่างระดับแรงดันพังทลาย (V_Z) ต่ออุณหภูมิ 1°C และหา V_Z ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบในวงจรรวมในหัวข้อที่ 4.4.2 โดยวงจรที่ใช้ทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.26 กำหนดกระแส $I_T = 20\text{mA}$ เื่อนใจที่ใช้กำหนดกระแสจะเหมือนกับ datasheet ของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N5226 ถึง 1N5231 (ยกเว้นเบอร์ 1N5230) ให้ D_{Z1} มี $V_Z = 3.3\text{V}$, D_{Z2} มี $V_Z = 3.6\text{V}$, D_{Z3} มี $V_Z = 3.9\text{V}$, D_{Z4} มี $V_Z = 4.3\text{V}$, D_{Z5} มี $V_Z = 5.1\text{V}$ ผลตอบสนองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.27 ถึง 4.31 ตามลำดับ



รูปที่ 4.26 วงจรที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของซีเนอร์ไดโอดโดยใช้โปรแกรม PSpice

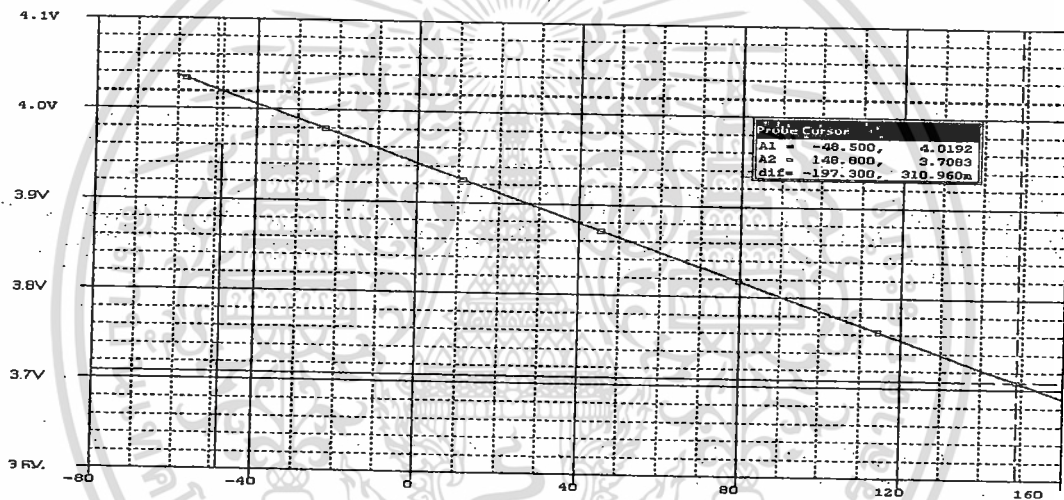


รูปที่ 4.27 ผลตอบสนองของแรงดันต่ออุณหภูมิของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N5226



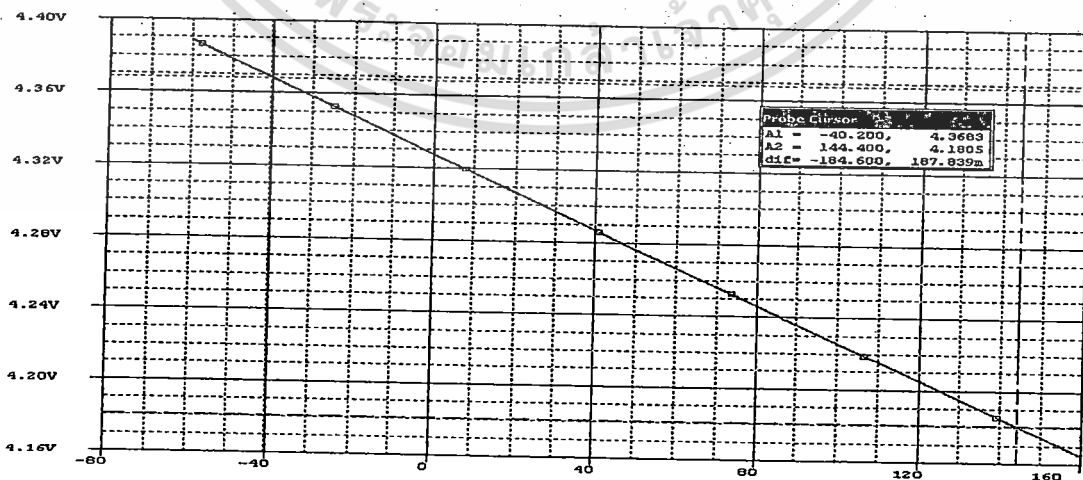
องศาเซลเซียส °C

รูปที่ 4.28 ผลตอบสนองของแรงดันต่ออุณหภูมิของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N5227



องศาเซลเซียส °C

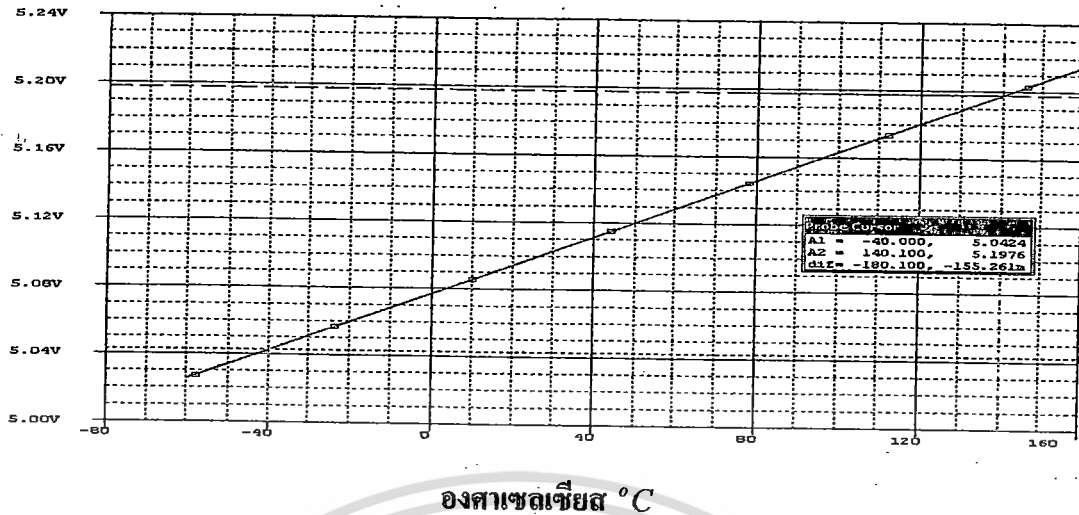
รูปที่ 4.29 ผลตอบสนองของแรงดันต่ออุณหภูมิของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N5228



องศาเซลเซียส °C

รูปที่ 4.30 ผลตอบสนองของแรงดันต่ออุณหภูมิของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N5229

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 ผลตอบสนองของแรงดันต่ออุณหภูมิของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N5231

จากผลกราฟการจำลองการทำงานของซีเนอร์ที่ค่า Vz ต่างกันแรงดันตกคร่อมซีเนอร์ที่วัดได้มีความเป็นเชิงเส้นตลอดย่านการทำงาน โดยผลตอบสนองของ Vz ต่ออุณหภูมิของ D_{Z1}, D_{Z2}, D_{Z3}, D_{Z4}, ในรูปที่ 4.27, 4.28, 4.29, 4.30 ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้แรงดัน Vz ลดลงเป็นไปตามปรากฏการณ์ทันเนล และในทางกลับกันผลตอบสนองของ Vz ต่ออุณหภูมิของ D_{Z5} ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้แรงดันสูงขึ้นดังรูปที่ 4.31 สอดคล้องกับปรากฏการณ์การพังทลายแบบอะวาแลนซ์ซึ่งปรากฏการณ์ทั้งหมดอธิบายในหัวข้อที่ 2.3.3

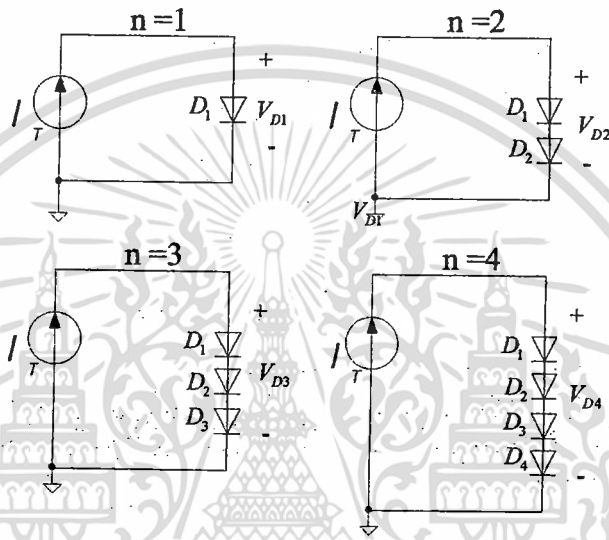
รูปที่ 4.27 ถึง รูปที่ 4.31 ทดสอบระหว่างอุณหภูมิ- 60°C ถึง 160 °C และผลของ $\Delta V_Z / \Delta T$ ของซีเนอร์แต่ละเบอร์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการเปรียบเทียบ $\Delta V_Z / \Delta T$ ที่อุณหภูมิ- 60°C ถึง 160 °C ของกราฟรูปที่ 4.27-4.31

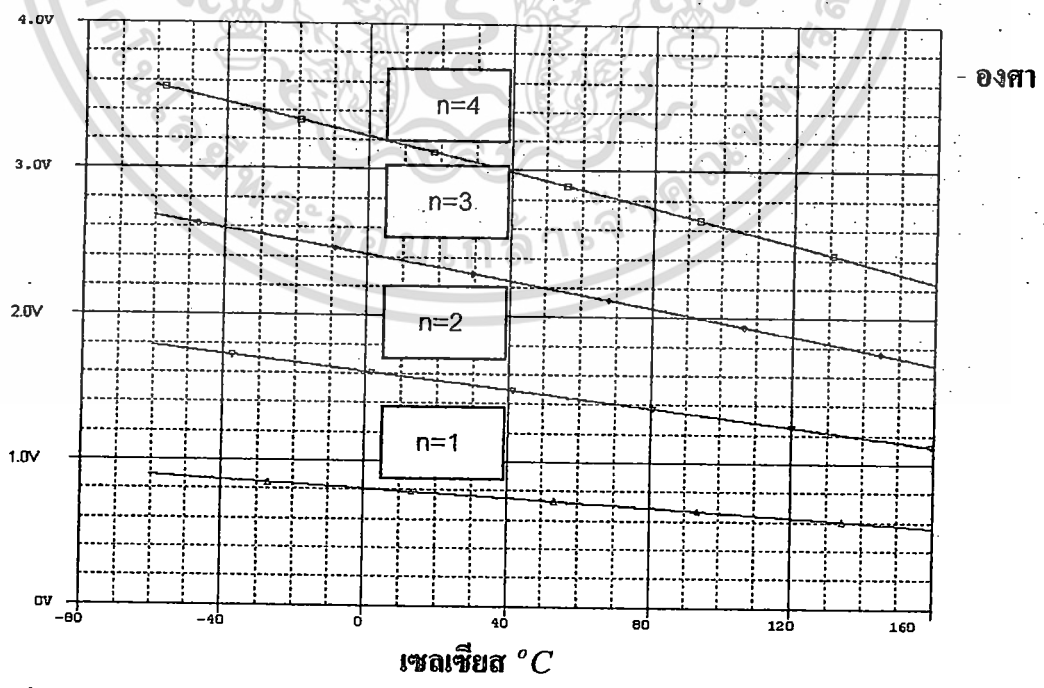
Zn	เบอร์	V _Z	$\Delta V_Z / \Delta T$ (mV/°C)
Z1	1N5226	3.3V	-2.732
Z2	1N5227	3.6V	-2.076
Z3	1N5228	3.9V	-1.576
Z4	1N5229	4.3V	-1.018
Z5	1N5231	5.1V	0.862

4.3.3 การใช้โปรแกรม PSpiceในการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อแรงดันไปข้างหน้าของรอยต่อพี-เอ็น

นำโปรแกรม PSpice มาทำการจำลองการทำงานของรอยต่อพี-เอ็นทางด้านไบอัสไปข้างหน้า ให้ D_1, D_2, D_3 และ D_4 ใช้เบอร์ 1N4152 ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ V_D และทำการอนุกรมรอยต่อพี-เอ็นเพิ่มเข้าไป n ตัว โดยกำหนดให้ $n=1,2,3$ และใช้ $I_T = 20\text{ mA}$ ดังรูปที่ 4.32 และให้ผลตอบสนองต่ออุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.32 วงจรที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น โดยใช้โปรแกรม Pspice



รูปที่ 4.33 ผลตอบสนองของแรงดันต่ออุณหภูมิของไดโอดเบอร์ 1N4152 ในกรณีที่มี $n=1$ ถึง 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 4.33 แรงดันเอาต์พุตที่ได้ยังคงมีความเป็นเชิงเส้นตลอดย่านการทำงานระหว่างอุณหภูมิที่ -60°C ถึง 160°C โดยผลของ $\Delta V_D / \Delta T$ สรุปได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบ $\Delta V_D / \Delta T$ รูปที่ 4.33 ระหว่างอุณหภูมิ -60°C ถึง 160°C

n	V_D ที่อุณหภูมิ 27°C	$\Delta V_D / \Delta T$ (mV)
1	0.766V	-1.506
2	1.534V	-3.013
3	2.3V	-4.519
4	3.067V	-6.026

จากผลของตารางที่ 4.4 สามารถเขียนเป็นสมการที่ (4.40) ได้ว่า

$$V_{Dn} = nV_{DI} \quad (4.40)$$

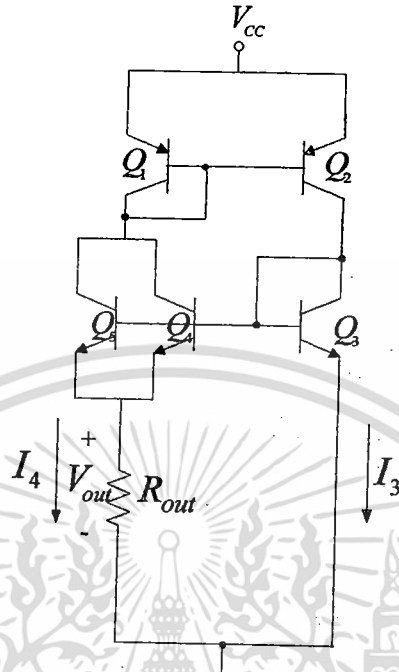
และจากสมการนี้จึงทำให้เกิดแนวคิดในการเพิ่ม $\Delta V_D / \Delta T$ โดยการอนุกรมรอยต่อพี-เอ็น เข้าไป n ตัวได้ดังสมการที่ (4.41)

$$\frac{\Delta V_{DN}}{\Delta T} = n \frac{\Delta V_{DI}}{\Delta T} \quad (4.41)$$

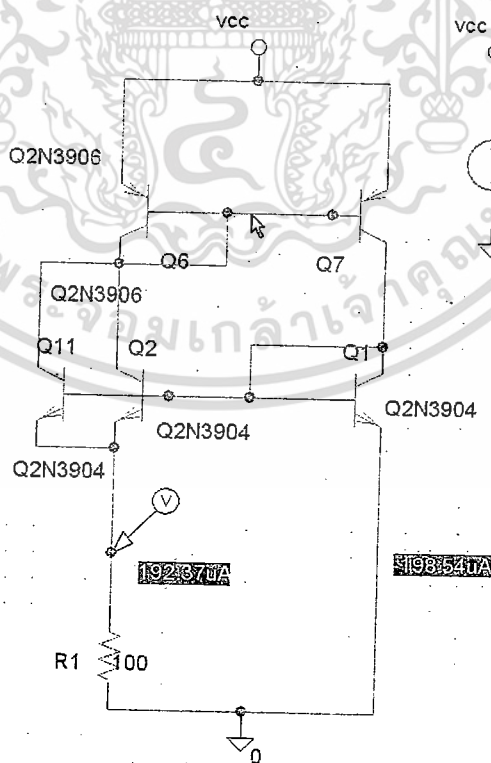
และเมื่อนำผลจากตารางที่ 4.4 มาทำการเปรียบเทียบกับสมการที่ (4.40) จะเห็นว่าเป็นจริงเนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดที่ 0.8 % โดยกำหนดให้ $n = 1, 2, 3, \dots, n$ เป็นรอยต่อพี-เอ็นที่มีโครงสร้างและชนิดเดียวกัน

4.3.4 การใช้โปรแกรม PSpice ในการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจร PTAT อนุกรมกับโหลดความต้านทาน

นำโปรแกรม PSpice มาทำการจำลองโครงสร้างของวงจร PTAT อนุกรมกับโหลดความต้าน (R_{OUT}) ในรูปที่ 4.34 กำหนดให้ Q_1 และ Q_2 ใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด PNP เบอร์ 2N3906 และ Q_3, Q_4 และ Q_5 ใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN เบอร์ 2N3904 กำหนดให้ $V_{CC} = 2.5\text{V}$ ตัวต้านทานมีค่า $R_{OUT} = 100\Omega$ จะได้ค่า $I_3 \approx I_4$ ดังรูปที่ 4.35

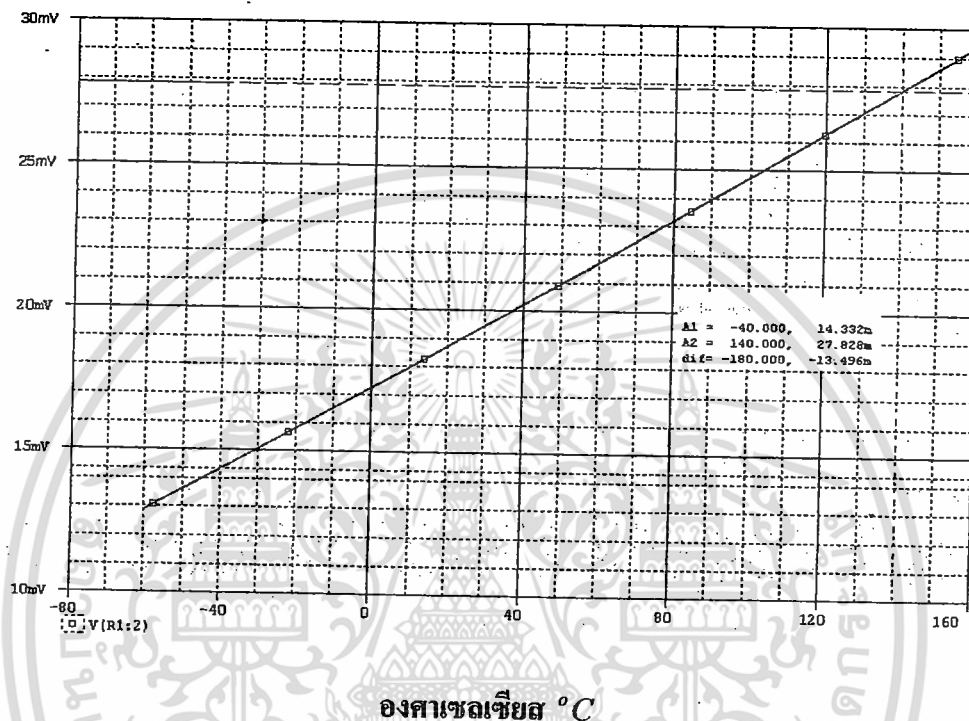


รูปที่ 4.34 วงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out}



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น รูปที่ 4.35 ผลของกระแส I_3 และ I_4 ของวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out} ั้งที่มีการนำไปใช้

โดยผลของรูปที่ 4.35 จะให้ $\Delta V_{out} / \Delta T = 0.09 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ และมีแรงดันเอาต์พุตเริ่มต้นที่ 12.88 mV ที่อุณหภูมิ -60°C และมีความเป็นเชิงเส้นตลอดย่านการทำงานที่อุณหภูมิระหว่าง -60°C ถึง 160°C ดังรูปที่ 4.36

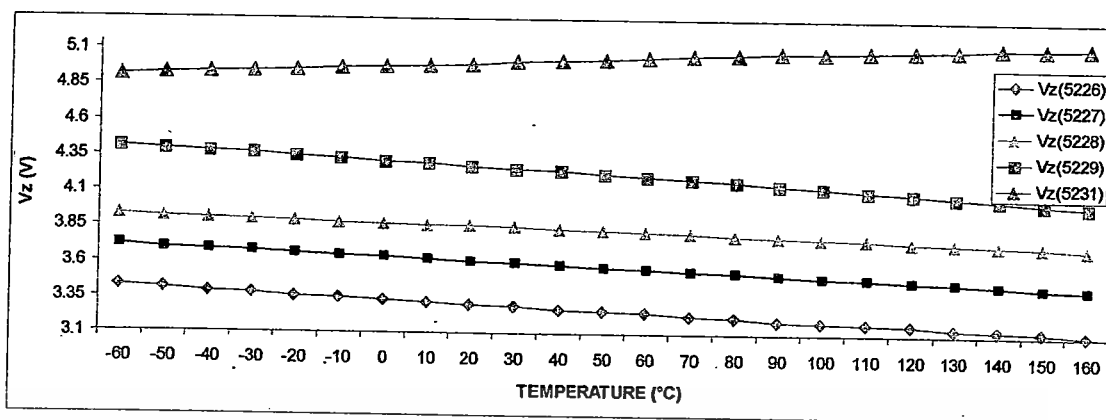


รูปที่ 4.36 ผลตอบสนองของแรงดันต่ออุณหภูมิของแรงดันเอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 4.34

4.3.5 การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันฟังกหลายที่ต่างระดับกันของรอยต่อซีเนอร์โดยการทดสอบจริง

ทำการต่อวงจรรูปที่ 4.26 กำหนดให้ D_{Z1} หรือ 1N5226 มีแรงดัน $V_{Z1} = 3.3\text{V}$, D_{Z2} หรือ 1N5227 มีแรงดัน $V_{Z2} = 3.6\text{V}$, D_{Z3} หรือ 1N5228 มีแรงดัน $V_{Z3} = 3.9\text{V}$, D_{Z4} หรือ 1N5229 มีแรงดัน $V_{Z4} = 4.3\text{V}$ และ D_{Z5} หรือ 1N5231 มีแรงดัน $V_{Z5} = 5.1\text{V}$

ในที่นี้กำหนดให้ D_{Z1} , D_{Z2} , D_{Z3} , D_{Z4} และ D_{Z5} ทำการทดสอบในย่านไบอัสย้อนกลับ ดังรูปที่ 4.16(ก) และ 4.16(ข) ใช้แหล่งจ่ายกระแสในรูปที่ 4.17 กำหนดกระแสที่ไหลผ่าน D_{Z1} , D_{Z2} , D_{Z3} , D_{Z4} และ $D_{Z5} = 20\text{mA}$ ทำการทดสอบและบันทึกแรงดันตกคร่อมรอยต่อซีเนอร์ไดโอดทีละค่า ให้ D_{Z1} , D_{Z2} , D_{Z3} , D_{Z4} และ D_{Z5} แทนที่ D_{Z1} และ D_{Z2} ตามลำดับ



องศาเซลเซียส °C

รูปที่ 4.37 ผลการวัดระดับความแตกต่างของแรงดันพังทลายของซีเนอร์ไดโอดต่ออุณหภูมิ

จากผลการวัดจริงที่ได้ของ D_{Z1} , D_{Z2} , D_{Z3} , D_{Z4} และ D_{Z5} ในรูปที่ 4.37 ผลที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงการวัด โดยในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นแรงดันตกคร่อมรอยต่อซีเนอร์ลดลงสอดคล้องกับปรากฏการณ์พังทลายแบบทลแนลลิ่ง ซึ่งค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการจำลองการทำงานในรูปที่ 4.27, 4.28, 4.29, 4.30 และ 4.31

ดังนั้นรูปที่ 4.37 จึงสรุปได้ว่าในกรณีที่แรงดันพังทลายมีค่ามากกว่า 4.3 V จะมีโอกาสเกิดปรากฏการณ์อะวาลันซ์ได้มากกว่าแรงดันพังทลายที่มีค่าต่ำๆ และในทางกลับกันในกรณีซีเนอร์ไดโอดมีแรงดันพังทลายต่ำกว่า 4.3 V จะมีโอกาสเกิดปรากฏการณ์ทลแนลลิ่งได้มากกว่า

ตารางที่ 4.5 สรุปผลการเปรียบเทียบ $\Delta V_Z / \Delta T$ ที่อุณหภูมิ -60°C ถึง 160°C ของกราฟรูปที่ 4.37

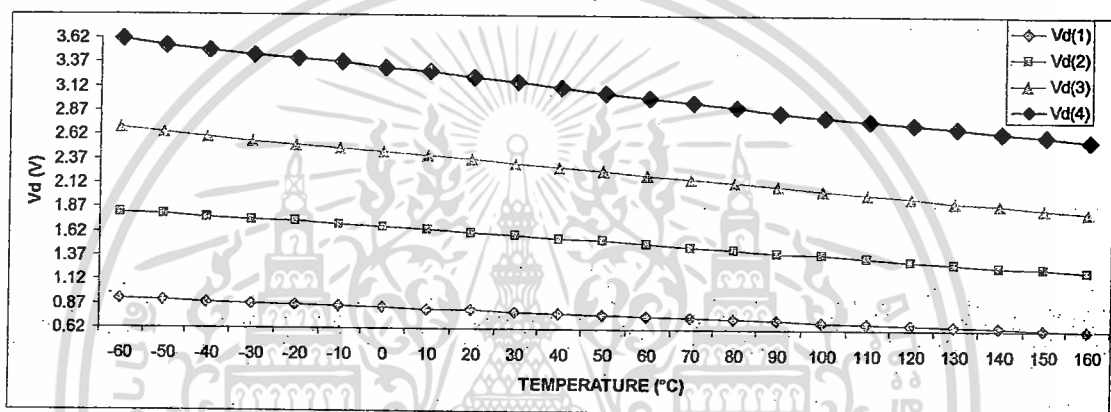
D_{Zn}	เบอร์	V_Z	$\Delta V_Z / \Delta T$ (mV/°C)
D_{Z1}	1N5226	3.3V	-1.40
D_{Z2}	1N5227	3.6V	-1.36
D_{Z3}	1N5228	3.9V	-1.25
D_{Z4}	1N5229	4.3V	-1.13
D_{Z5}	1N5231	5.1V	1

จากเปรียบเทียบค่าในตารางที่ 5 และตารางที่ 3 สรุปได้ว่าผลอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันพังทลายต่ออุณหภูมิ 1°C มีค่าไม่ต่างกันมากยกเว้นค่าของ D_{Z2} ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการทำวิจัยในการเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานและผลการวัดจริง จึงใช้ D_{Z1} ในการทดลองซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 4.4

4.3.6 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ส่งผลต่อแรงดันไปข้างหน้าของรอยต่อพี-เอ็นโดยใช้ชุดทดสอบคุณสมบัติที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

ทำการบันทึกการทดลองให้ D_1, D_2, D_3 และ D_4 ใช้เบอร์ 1N4152 เหมือนกันเพื่อให้มีเงื่อนไขโครงสร้างเดียวกันและกระแสที่ไหลผ่านเท่ากัน ในที่นี้กำหนดให้กระแสที่ไหลผ่าน D_1, D_2, D_3 และ $D_4 = 20\text{mA}$ โดยวิธีการทดลองได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.3.1

ในที่นี้กำหนดให้ D_1, D_2, D_3 และ D_4 ทำการทดสอบในย่านไบอัสตรงดังรูปที่ 4.16(ก) ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.38 โดย diode 1 มี $n = 1$, diode 2 มี $n = 2$, diode 3 มี $n = 3$ และ diode 4 มี $n = 4$



องศาเซลเซียส °C

รูปที่ 4.38 ผลการวัดรอยต่อพี-เอ็น อนุกรม n รอยต่อ โดยกำหนดให้ $n = 1, 2, 3$ และ 4 ต่ออุณหภูมิ จากผลการวัดจริงที่ได้ของ diode 1, diode 2, diode 3 และ diode 4 ในรูปที่ 4.38 ผลที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นตลอดการวัด โดยในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นแรงดันตกคร่อมรอยต่อพี-เอ็นลดลง ซึ่งสอดคล้องกับปรากฏการณ์ของอุณหภูมิที่มีผลต่อรอยต่อพี-เอ็น[] ซึ่งค่าของรอยต่อพี-เอ็นอนุกรม $n = 1, 2, 3$ และ 4 มีค่าใกล้เคียงกับรูปที่ 4.33

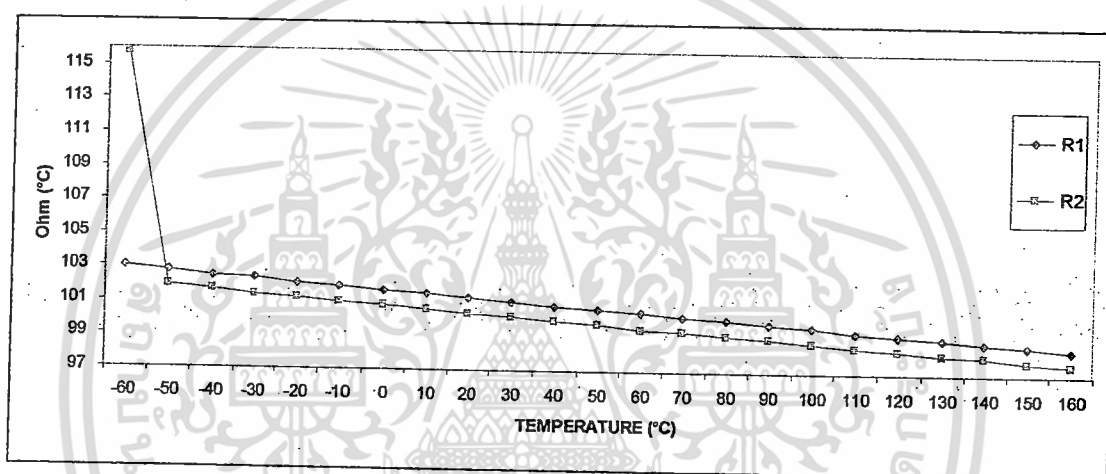
ตารางที่ 4.6 สรุปผลการเปรียบเทียบ $\Delta V_D / \Delta T$ ที่อุณหภูมิ -60°C ถึง 160°C ของกราฟรูปที่ 4.38

n	V_D ที่อุณหภูมิ 30°C	$\Delta V_D / \Delta T$ (mV)
1	0.851V	-1.38
2	1.564V	-2.70
3	2.267V	-3.87
4	3.067V	-4.59

โดยผลจากตารางที่ 8 นำค่าพารามิเตอร์มาใส่ในสมการที่ 4.41 ผลที่ได้จะมีความสอดคล้องกันบางส่วนเนื่องจากในความเป็นจริงแม้ว่าจะกำหนดให้รอยต่อพี-เอ็นใช้เบอร์เดียวกัน แต่โครงสร้างอาจมีความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ทำให้ผลที่ได้ไม่ตรงกับการจำลองการทำงานมากนัก โดยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมากที่สุด $n = 3$ มีค่าประมาณ 85.64 %

4.3.7 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ส่งผลต่อชนิดของตัวต้านทานโดยใช้ชุดทดสอบคุณสมบัติที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

ทำการบันทึกผลการทดลอง กำหนดให้ R_1 เป็นความต้านทานแบบ metal film Fix resistor และ R_2 เป็นความต้านทานแบบ carbon film Fix resistor โดยกำหนดให้ค่า $R_1 = R_2 = 100\Omega$

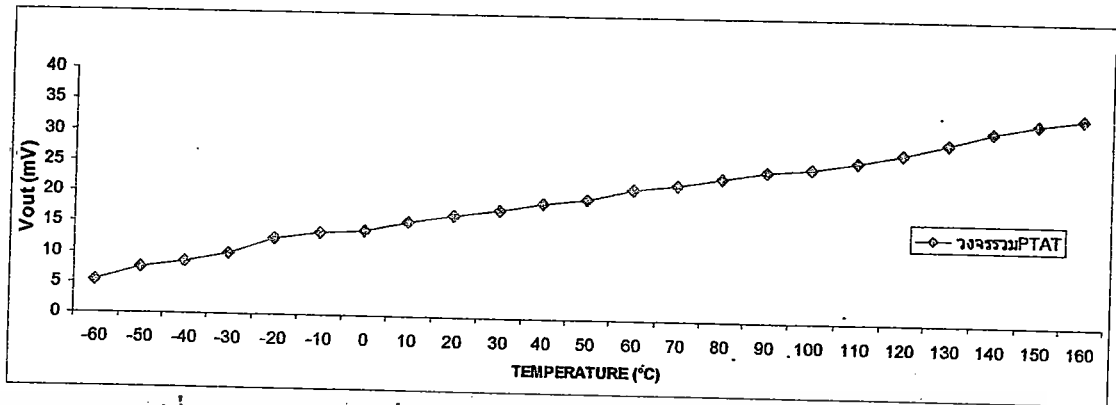


รูปที่ 4.39 ผลวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อชนิดของตัวต้านทาน

จากผลการวัดจริงที่ได้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลต่อเนื้อวัสดุของความต้านทาน โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า R_1 ก่อนข้างมีความเป็นเชิงเส้นมากกว่า R_2 จากผลดังกล่าว ความต้านทาน R_2 จะเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจร PTAT ที่จะกล่าวในหัวข้อที่ 4.3.8

4.3.8 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ส่งผลต่อวงจร PTAT ที่อนุกรมกับโหลดความต้านทานโดยใช้ชุดทดสอบคุณสมบัติที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

การทดสอบครั้งนี้กำหนดให้ Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 และ V_{CC} เป็นไปตามเงื่อนไขในหัวข้อที่ 4.3.4 กำหนดให้โหลดความต้านทาน หรือ R_{out} เป็นแบบ metal film fix resistor, R_2 ในหัวข้อที่ 4.3.7 วงจรที่ใช้ในการทดสอบในครั้งนี้เป็นไปตามรูปที่ 4.34 และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 ผลวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out}

ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่งผลต่อแรงดันเอาต์พุตหรือ V_{out} ผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ที่วัดได้มีค่าประมาณ $0.12 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ มีค่าค่อนข้างเป็นเชิงเส้นมากระหว่างอุณหภูมิตั้งแต่ -60°C ถึง 160°C

จากข้อจำกัดของชนิด R_{out} ในหัวข้อที่ 4.3.7 ส่งผลต่อแรงดันเอาต์พุตในช่วงระหว่าง -60°C ถึง 160°C มีค่าความชันเกิดขึ้นค่า ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตจากการวัดเริ่มต้นตั้งแต่ -60°C มีค่าไม่ค่อยเป็นเชิงเส้น และความสามารถอันจำกัดของ Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 และ Q_5 ที่มีผลต่ออุณหภูมิทำให้วงจรนี้ทำงานไม่ค่อยเป็นเชิงเส้น

4.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลของความแตกต่างของรอยต่อพี-เอ็นกับรอยต่อซีเนอร์โดยใช้วงจร PTAT และความแตกต่างของรอยต่อซีเนอร์กับรอยต่อซีเนอร์โดยใช้วงจร PTAT

การศึกษาในหัวข้อที่ 4.4 เป็นการนำการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีผลต่อพารามิเตอร์ทั้งหมดของรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์ในหัวข้อที่ 4.3 มาเป็นส่วนประกอบสำคัญในการสร้างอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบวงจร PTAT ให้มีผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่ไวขึ้น หรือ $\Delta V_{out} / \Delta T$ มีค่าสูงขึ้นและทำการวิเคราะห์ผล $\Delta V_{out} / \Delta T$ ของวงจร PTAT ที่ทำการประยุกต์ระหว่างการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice กับการใช้ชุดทดสอบวงจรตรวจวัดอุณหภูมิในหัวข้อที่ 3.3.1 จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.7 พิสูจน์ได้ว่าผลการวัดจริงของวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out} ที่ได้ไม่ค่อยเป็นเชิงเส้นมากนักตลอดย่านการทำงานตั้งแต่ -60°C ถึง 160°C โดยข้อจำกัดเกิดขึ้นจาก R_{out} และ Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 เป็นสำคัญ

หัวข้อนี้นำเสนอวิธีการทดสอบแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

- 1) การทดสอบเฉพาะผลการตอบสนองของอุณหภูมิที่มีต่อรอยต่อซีเนอร์กับรอยต่อพี-เอ็นอินอนุกรม 1 ถึง 4 รอยต่อกับวงจร PTAT และแบบซีเนอร์ไดโอดกับรอยต่อซีเนอร์ตั้งแต่ 3.3 ถึง 4.3 ต่อกับวงจร PTAT โดยวงจร PTAT และความต้านทาน R_{out} จะถูกวางอยู่ภายนอกกรอบแล้วทำการทดสอบวัดผล $\Delta V_{out} / \Delta T$ ผ่านความต้านทาน R_{out} เพื่อศึกษาผล $\Delta V_{out} / \Delta T$ ของรอยต่อซีเนอร์กับรอยต่อพี-เอ็นอินอนุกรม 1 ถึง 4 รอยต่อกับวงจร PTAT รวมถึงย่านการทำงานและแรงดัน V_{cc} ที่ใช้ในวงจร
- 2) การทดสอบผลการตอบสนองของอุณหภูมิที่มีต่อวงจร PTAT ด้วยไดโอดรอยต่อพี-เอ็นอินอนุกรม 1 ถึง 4 กับรอยต่อซีเนอร์ และรอยต่อซีเนอร์ตั้งแต่ 3.3 ถึง 4.3 โวลต์กับซีเนอร์ไดโอดโดยวงจร PTAT ที่มีการเพิ่มส่วนไดโอดกับซีเนอร์และความต้านทาน R_{out} จะถูกวางอยู่ภายในระบบ แล้วทำการทดสอบวัดผล $\Delta V_{out} / \Delta T$ ผ่านความต้านทาน R_{out} เพื่อศึกษาผล $\Delta V_{out} / \Delta T$ ของรอยต่อซีเนอร์กับรอยต่อพี-เอ็นอินอนุกรม 1 ถึง 4 รอยต่อกับวงจร PTAT รวมถึงย่านการทำงานและแรงดัน V_{cc} รวมถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อทรานซิสเตอร์และความต้านทาน R_{out} ภายในวงจร

4.4.1 การทดลองการตอบสนองต่ออุณหภูมิของความแตกต่างระหว่างรอยต่อพี-เอ็นกับรอยต่อซีเนอร์โดยใช้วงจร PTAT และความแตกต่างระหว่างรอยต่อซีเนอร์กับรอยต่อซีเนอร์โดยใช้วงจร PTAT

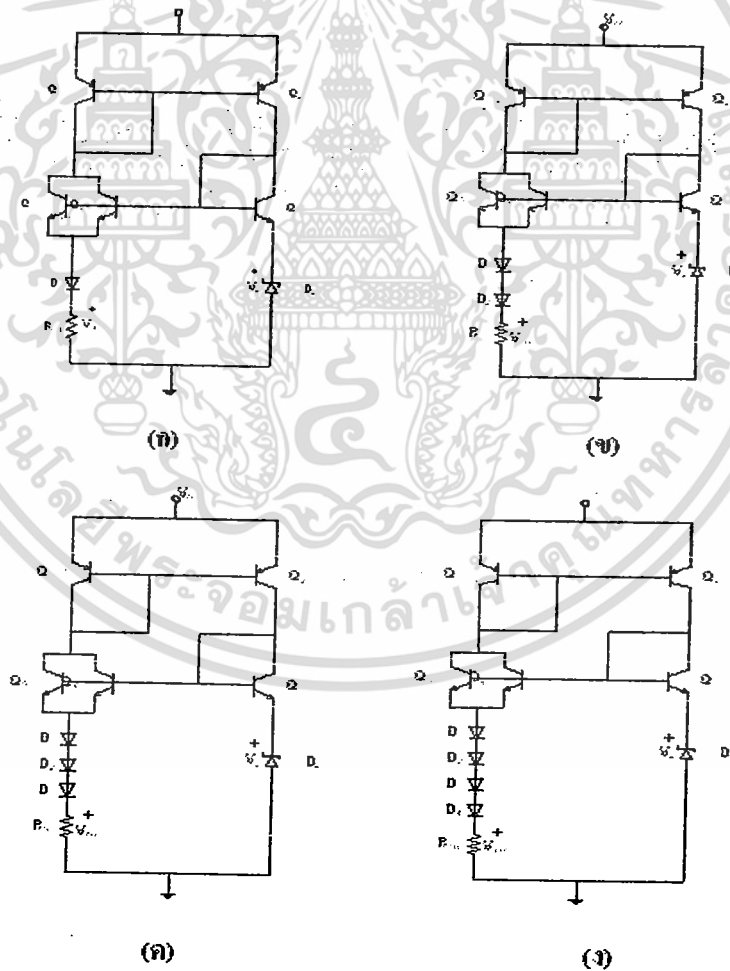
จากวงจรรูปที่ 4.41 กำหนดเงื่อนไขให้ Q_1 และ Q_2 ใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด PNP เบอร์ 2N3906 และ Q_3, Q_4 และ Q_5 ใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN เบอร์ 2N3904

โดยในหัวข้อที่ 4.4.2 ใช้รูปที่ 4.41 ในการทดสอบ การทดสอบนี้เพื่อเน้นผลการตอบสนองต่ออุณหภูมิเฉพาะรอยต่อพี-เอ็นและเป็นตัวรอยต่อซีเนอร์ กำหนดให้ D_1 ถึง D_4 ใช้เบอร์ 1N4152 และ D_{21} ใช้เบอร์ 1N5231 ในส่วนของ D_{22} จะใช้รอยต่อซีเนอร์ตั้งแต่ 3.3 ถึง 4.3 ดังรูปที่ 4.41(จ) กำหนดวงจร PTAT และความต้านทาน R_{out} จะถูกวางอยู่ภายนอกกรอบ R_{out} เป็นค่าคงที่ ทำหน้าที่กำหนดกระแสของวงจร PTAT มีค่าเข้าใกล้ 20 mA เพื่อสอดคล้องกับ Datasheet ของซีเนอร์ไดโอด อุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

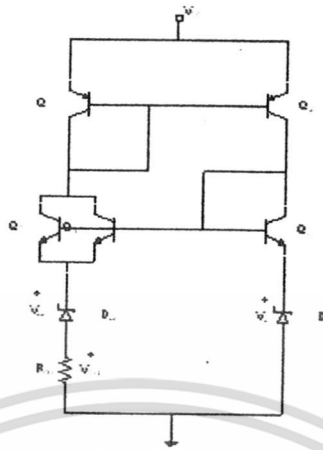
ส่วนในหัวข้อที่ 4.4.3 ใช้รูปที่ 4.41 ในการทดสอบ การทดสอบนี้เพื่อเน้นผลการตอบสนองของอุณหภูมิที่มีต่อวงจร PTAT ผลตอบสนองต่ออุณหภูมิเฉพาะรอยต่อพี-เอ็นและเป็นสำคัญ รอยต่อซีเนอร์ กำหนดให้ D_1 ถึง D_4 ใช้เบอร์ 1N4152 และ D_{21} ใช้เบอร์ 1N5231 ในส่วนของ D_{22} จะใช้รอยต่อ ซีเนอร์ตั้งแต่ 3.3 ถึง 4.3 ดังรูปที่ 4.41(จ) กำหนดวงจร PTAT และความต้านทาน R_{out} จะถูกวางอยู่ภายในระบบ R_{out} เป็นแบบฟิล์มโลหะ R_{out} ค่าคงที่ทำหน้าที่กำหนดกระแสของวงจร PTAT มีค่าเข้าใกล้ 20 mA เพื่อสอดคล้องกับ Datasheet ของซีเนอร์ไดโอด อุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.42

เนื่องจากหัวข้อที่ 4.3 เป็นการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีผลต่อพารามิเตอร์ของแต่ละอุปกรณ์ หรือ V_D และ V_Z ส่วนเนื้อหาหลักของหัวข้อที่ 4.2 มุ่งเน้นถึงผลรวมของแรงดันตกคร่อม R_{out} หรือแรงดันเอาต์พุต



(ก) - (ง) วงจร PTAT แบบรอยต่อพี-เอ็นอนุกรมรอยต่อกับรอยต่อซีเนอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)

(จ) วงจร PTAT แบบรอยต่อซีเนอร์กับรอยต่อซีเนอร์

รูปที่ 4.41 วงจรรวมสำหรับทดสอบคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์



รูปที่ 4.42 วงจรรวมที่ 1 ที่ใช้ในการทดสอบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.43 วงจรรวมที่ 2 ที่ใช้ในการทดสอบจริง

รูปที่ 4.44 ภาพถ่ายจริงชุดกำเนิดคูลหมุมสำหรับวงจรรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การวิเคราะห์ผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของรอยต่อพี-เอ็นกับ รอยต่อซีเนอร์ที่มีต่อวงจร PTAT และรอยต่อซีเนอร์กับรอยต่อซีเนอร์ที่มีต่อ วงจร PTAT

ทำการทดลองการทำงานในรูปที่ 4.41(ก)- 4.41(จ) โดยกำหนดให้ V_{CC} และปรับความต้านทาน R_{out} ให้กระแส $I_D \approx I_{DZ} \approx 20mA$ ในการทดลองนี้จะอ้างอิงจากโปรแกรม PSpice ซึ่งค่าที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับเงื่อนไขในการออกแบบหาค่า V_{CC} และ R_{out} ในหัวข้อที่ 4.1.2 โดยผลที่ได้จากการวัดจริงที่ได้จากมัลติมิเตอร์ จะได้ค่า $\Delta V_{out} / \Delta T$ ของวงจรดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 (ก) สรุปผลการเปรียบเทียบ $\Delta V_{OUT} / \Delta T$ ที่อุณหภูมิ -60°C ถึง 160 °C ของ วงจรรูปที่ 4.41(ก)- 4.41(ง)

n	V_D ที่อุณหภูมิ 30 °C	$\Delta V_{OUT} / \Delta T$ (mV/°C)
1	0.766V	2.3
2	1.534V	4.18
3	2.3V	5.29
4	3.067V	5.95

จาก ตารางที่ 4.7 (ก) ผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ที่สูงที่สุดที่วัดได้มีค่าประมาณ 5.95mV/°C ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -60°C ถึง -160°C เริ่มต้นแรงดันเอาต์พุตที่ 1.711 V ที่อุณหภูมิ -60°C ซึ่งเป็น ไดโอดพี-เอ็นเบอร์ 4152อนุกรมกัน 4 รอยต่อแรงดันตกคร่อม 3.067 V กับซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 5231แรงดันพังทลาย 5.1 V ซึ่งเป็นแรงดันอ้างอิง และมี $\Delta V_{out} / \Delta T$ มากกว่าวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out} ในหัวข้อที่ 4.3.8 อยู่ประมาณ 49.58เท่า

ตารางที่ 4.7 (ข) สรุปผลการเปรียบเทียบ $\Delta V_{OUT} / \Delta T$ ที่อุณหภูมิ -60°C ถึง 160 °C ของ วงจรรูปที่ 4.41(จ)

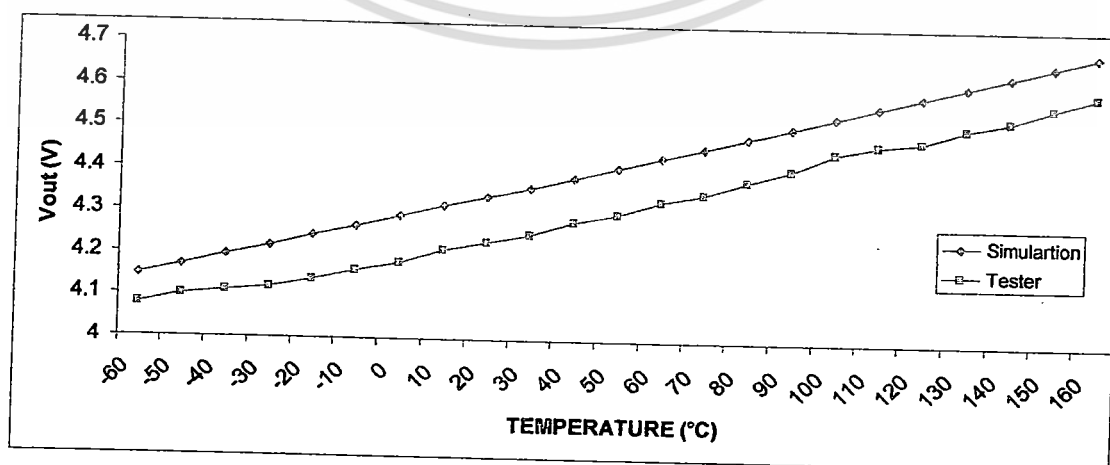
Zn	เบอร์	V_z	$\Delta V_{OUT} / \Delta T$ (mV/°C)
Z1	1N5226	3.3V	2.670
Z2	1N5227	3.6V	2.644
Z3	1N5228	3.9V	2.615
Z4	1N5229	4.3V	2.395

ส่วนผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ที่ต่ำที่สุดที่วัดได้มีค่าประมาณ $2.395 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -60°C ถึง -160°C เริ่มต้นแรงดันเอาต์พุตที่ 0.611 V ที่อุณหภูมิ -60°C ซึ่งเป็นซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 5229 แรงดันพังทลาย 4.3 V กับซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 5231 แรงดันพังทลาย 5.1 V ซึ่งเป็นแรงดันอ้างอิง และมี $\Delta V_{out} / \Delta T$ มากกว่าวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out} ในหัวข้อที่ 4.3.8 อยู่ประมาณ 19.96 เท่า

โดยผลลัพธ์ที่ได้คือแรงดันเอาต์พุตที่ได้มีขนาดใหญ่เพียงพอโดยไม่ต้องต่อวงจรขยายเหมือนที่ผ่านมา ซึ่งจากผลการทดลองนี้ทำให้เห็นว่างานในการทำงานกว้างขึ้นเมื่อทำการทดสอบผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉพาะรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์ ดังนั้นผลของ R_{out} และผลของ Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 จึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการกำหนดช่วงทดสอบอุณหภูมิในกรณีทดสอบกับวงจรรวมในหัวข้อที่ 4.4.3

4.4.3 การวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวงจร PTAT แบบรอยต่อพี-เอ็นอนุกรมรอยต่อกับรอยต่อซีเนอร์อนุกรมรอยต่อระหว่างผลการจำลองการทำงานและการวัดจริง

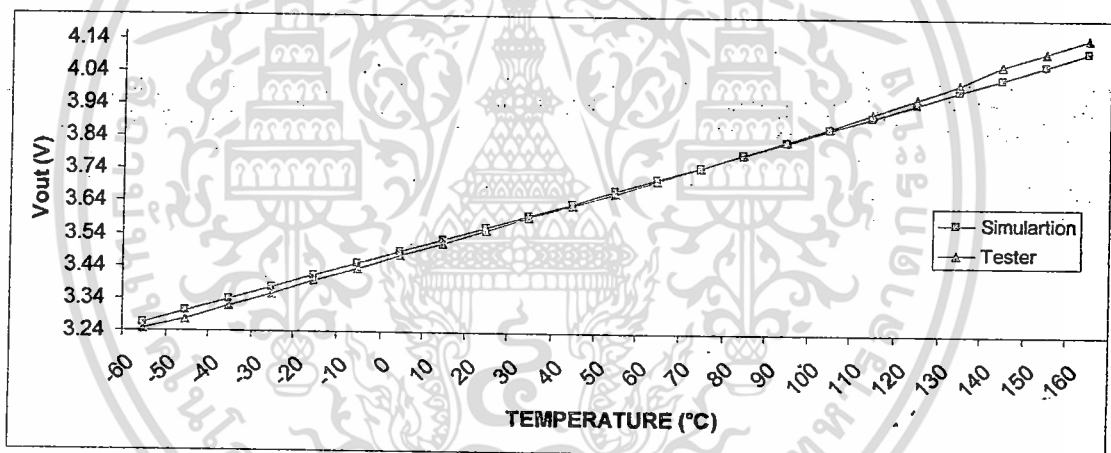
ทำการทดลองการทำงานในรูปที่ 4.41(ก) โดยกำหนดให้ V_{CC} มีค่าประมาณ 6.8 V และปรับความต้านทาน R_{out} ให้กระแส $I_D \approx I_{DZ} \approx 20 \text{ mA}$ ในการทดลองนี้ค่า R_{out} ที่ได้มีค่าประมาณ 223.5Ω ซึ่งค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับเงื่อนไขในการออกแบบหาค่า V_{CC} และ R_{out} ในหัวข้อที่ 4.3.2 โดยผลที่ได้จากการวัดจริงที่ได้จากมัลติมิเตอร์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSpice จะได้ดังรูปที่ 4.45



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.45 ผลการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมในรูปที่ 4.41(ก)

จากรูปที่ 4.45 ผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ที่วัดได้มีค่าประมาณ $2.3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -60°C ถึง -160°C เริ่มต้นแรงดันเอาต์พุตที่ 4.08 V ที่อุณหภูมิ -60°C โดยผลลัพธ์ที่ได้คือแรงดันเอาต์พุตที่ได้มีขนาดใหญ่เพียงพอโดยไม่ต้องต่อวงจรขยายเหมือนที่ผ่านมา และมี $\Delta V_{out} / \Delta T$ มากกว่าวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out} ในหัวข้อที่ 4.3.8 อยู่ประมาณ 18.25 เท่า

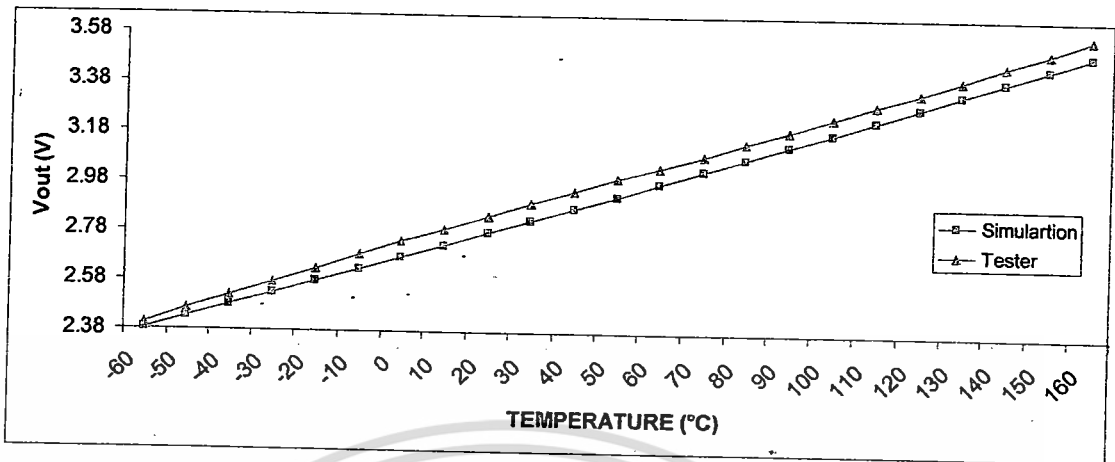
ทำการทดลองการทำงานในรูปที่ 4.41(ข) โดยกำหนดให้ V_{CC} มีค่าประมาณ 7.3 V และปรับความต้านทาน R_{out} ให้กระแส $I_D \approx I_{DZ} \approx 20 \text{ mA}$ ในการทดลองนี้ค่า R_{out} ที่ได้มีค่าประมาณ 181Ω ซึ่งค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับเงื่อนไขในการออกแบบหาค่า V_{CC} และ R_{out} ในหัวข้อที่ 4.3.2 โดยผลที่ได้จากการวัดจริงที่ได้จากมัลติมิเตอร์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSpice จะได้ดังรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 ผลการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมในรูปที่ 4.41(ข)

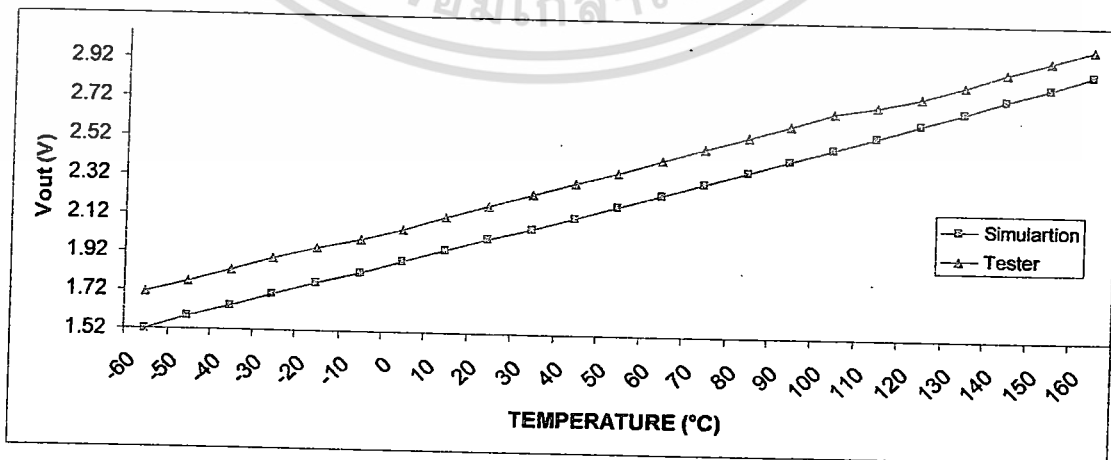
จากรูปที่ 4.46 ผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ที่วัดได้มีค่าประมาณ $4.185 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -60°C ถึง -160°C เริ่มต้นแรงดันเอาต์พุตที่ 3.247 V ที่อุณหภูมิ -60°C โดยผลลัพธ์ที่ได้คือแรงดันเอาต์พุตที่ได้มีขนาดใหญ่เพียงพอโดยไม่ต้องต่อวงจรขยายเหมือนที่ผ่านมา และมี $\Delta V_{out} / \Delta T$ มากกว่าวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out} ในหัวข้อที่ 4.3.8 อยู่ประมาณ 33.21 เท่า และให้ความไวเพิ่มขึ้นประมาณ 1.82 เท่าเมื่อเทียบกับวงจร 4.41(ก)

ทำการทดลองการทำงานในรูปที่ 4.41(ค) โดยกำหนดให้ V_{CC} มีค่าประมาณ 6.94 V และปรับความต้านทาน R_{out} ให้กระแส $I_D \approx I_{DZ} \approx 20 \text{ mA}$ ในการทดลองนี้ค่า R_{out} ที่ได้มีค่าประมาณ 145Ω ซึ่งค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับเงื่อนไขในการออกแบบหาค่า V_{CC} และ R_{out} ในหัวข้อที่ 4.3.2 โดยผลที่ได้จากการวัดจริงที่ได้จากมัลติมิเตอร์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSpice จะได้ดังรูปที่ 4.47



รูปที่ 4.47 ผลการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมในรูปที่ 4.41(ค)
 จากรูปที่ 4.47 ผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ที่วัดได้มีค่าประมาณ $5.29 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ในช่วงอุณหภูมิ
 ระหว่าง -60°C ถึง -160°C เริ่มต้นแรงดันเอาต์พุตที่ 2.406 V ที่อุณหภูมิ -60°C โดยผลลัพธ์ที่ได้
 คือแรงดันเอาต์พุตที่ได้มีขนาดใหญ่เพียงพอ โดยไม่ต้องต่อวงจรขยายเหมือนที่ผ่านมา และมี
 $\Delta V_{out} / \Delta T$ มากกว่าวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out} ในหัวข้อที่ 4.3.8 อยู่ประมาณ 41.98 เท่า และให้
 ความไวเพิ่มขึ้นประมาณ 2.3 เท่าเมื่อเทียบกับวงจร 4.41(ก)

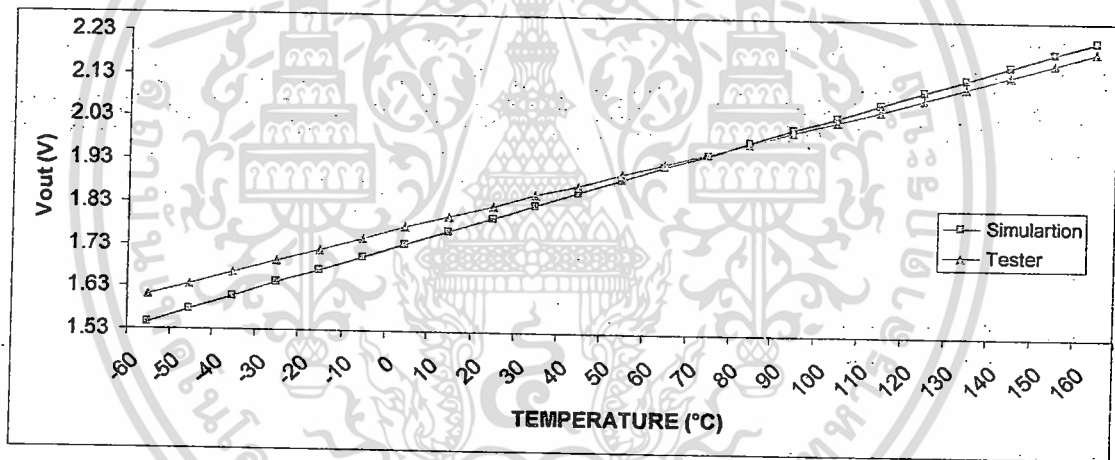
ทำการทดลองการทำงานในรูปที่ 4.41(ง) โดยกำหนดให้ V_{CC} มีค่าประมาณ 6.95V และ
 ปรับความต้านทาน R_{out} ให้กระแส $I_D \approx I_{DZ} \approx 20\text{mA}$ ในการทดลองนี้ค่า R_{out} ที่ได้มี
 ค่าประมาณ 90Ω ซึ่งค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับเงื่อนไขในการออกแบบหาค่า V_{CC} และ R_{out} ใน
 หัวข้อที่ 4.3.2 โดยผลที่ได้จากการวัดจริงที่ได้จากมัลติมิเตอร์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลอง
 การทำงาน โดยใช้โปรแกรม PSpice จะได้ดังรูปที่ 4.48



รูปที่ 4.48 ผลการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมในรูปที่ 4.41(ง)
 เอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในภาควิชาฯ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.48 ผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ที่วัดได้มีค่าประมาณ $5.95 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -60°C ถึง -160°C เริ่มต้นแรงดันเอาต์พุตที่ 1.711 V ที่อุณหภูมิ -60°C โดยผลลัพธ์ที่ได้คือแรงดันเอาต์พุตที่ได้มีขนาดใหญ่เพียงพอโดยไม่ต้องต่อวงจรขยายเหมือนที่ผ่านมา และมี $\Delta V_{out} / \Delta T$ มากกว่าวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out} ในหัวข้อที่ 4.3.8 อยู่ประมาณ 47.22 เท่า และให้ความไวเพิ่มขึ้นประมาณ 2.59 เท่าเมื่อเทียบกับวงจร 4.41(ก)

ทำการทดลองการทำงานในรูปที่ 4.41(จ) โดยกำหนดให้ V_{CC} มีค่าประมาณ 6.85V และกำหนดความต้านทาน $R_{out} = 96\Omega$ เพื่อให้กระแส $I_D \approx I_{DZ} \approx 20\text{mA}$ ซึ่งค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับเงื่อนไขในการออกแบบหาค่า V_{CC} และ R_{out} ในหัวข้อที่ 4.3.2 และใช้ซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 5226 แรงดันพังทลาย 3.3 V กับซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 5231 แรงดันพังทลาย 5.1 V ซึ่งเป็นแรงดันอ้างอิง โดยผลที่ได้จากการวัดจริงจากมัลติมิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.49

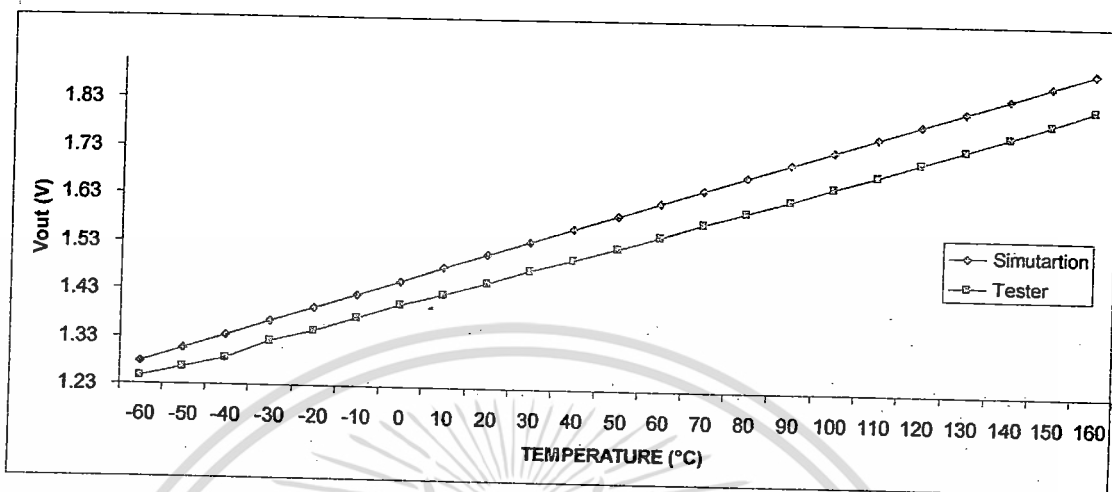


รูปที่ 4.49 ผลการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมในรูปที่ 4.23(จ) กรณี $V_{Z2} = 3.3 \text{ V}$

จากรูปที่ 4.49 ผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ที่วัดได้มีค่าประมาณ $2.670\text{mV}/^\circ\text{C}$ ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -60°C ถึง -160°C เริ่มต้นแรงดันเอาต์พุตที่ 1.611V ที่อุณหภูมิ -60°C และมี $\Delta V_{out} / \Delta T$ มากกว่าวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out} ในหัวข้อที่ 4.3.8 อยู่ประมาณ 21.19 เท่า

ทำการทดลองการทำงานในรูปที่ 4.41(จ) โดยกำหนดให้ V_{CC} มีค่าประมาณ 7V และกำหนดความต้านทาน $R_{out} = 76\Omega$ เพื่อให้กระแส $I_D \approx I_{DZ} \approx 20\text{mA}$ ซึ่งค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับเงื่อนไขในการออกแบบหาค่า V_{CC} และ R_{out} ในหัวข้อที่ 4.3.2 และใช้ซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 5227 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันพังทลาย 3.6 V กับซีเนอร์ไดโอดเบอร์5231แรงดันพังทลาย 5.1 V ซึ่งเป็นแรงดันอ้างอิง โดยผลที่ได้จากการวัดจริงจากมัลติมิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.50

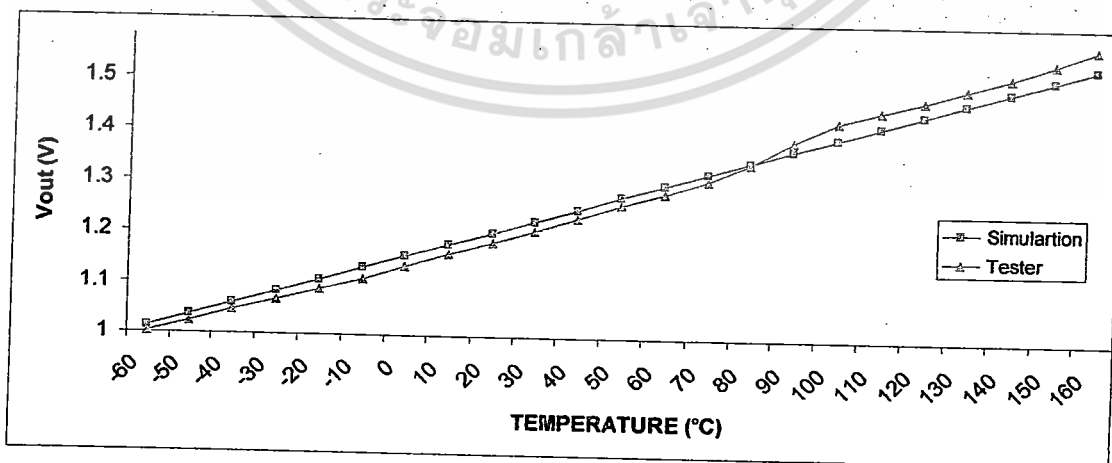


รูปที่ 4.50 ผลการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมในรูปที่ 4.23(จ)

กรณี $V_{Z2} = 3.6 V$

จากรูปที่ 4.50 ผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ที่วัดได้มีค่าประมาณ $2.644 mV/^\circ C$ ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง $-60^\circ C$ ถึง $160^\circ C$ เริ่มต้นแรงดันเอาต์พุตที่ $1.248 V$ ที่อุณหภูมิ $-60^\circ C$ และมี $\Delta V_{out} / \Delta T$ มากกว่าวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out} ในหัวข้อที่ 4.3.8 อยู่ประมาณ 20.98 เท่า

ทำการทดลองการทำงานในรูปที่ 4.41(จ) โดยกำหนดให้ V_{CC} มีค่าประมาณ $6.94 V$ และกำหนดความต้านทาน $R_{out} = 60 \Omega$ เพื่อให้กระแส $I_D \approx I_{DZ} \approx 20 mA$ ซึ่งค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับเงื่อนไขในการออกแบบหาค่า V_{CC} และ R_{out} ในหัวข้อที่ 4.3.2 และใช้ซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 5228 แรงดันพังทลาย $3.9 V$ กับซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 5231 แรงดันพังทลาย $5.1 V$ ซึ่งเป็นแรงดันอ้างอิง โดยผลที่ได้จากการวัดจริงจากมัลติมิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.51



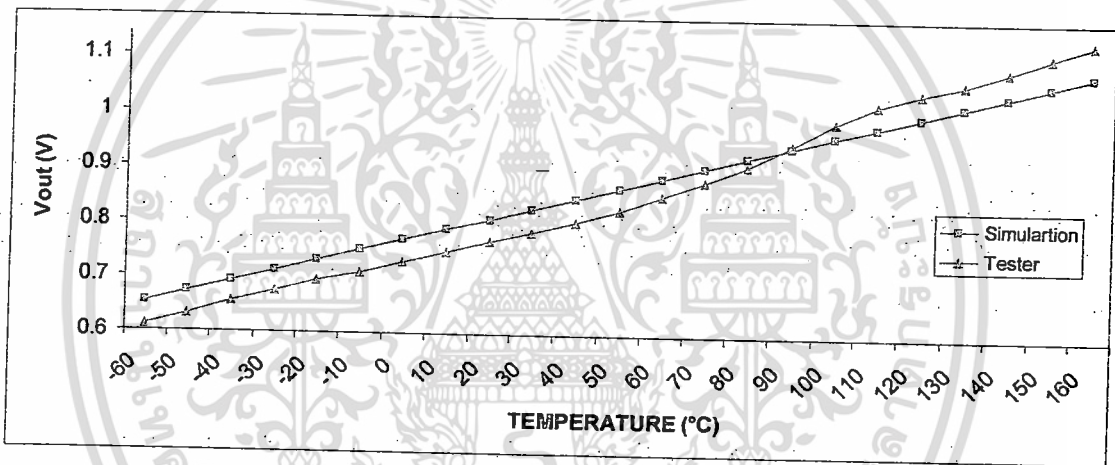
รูปที่ 4.51 ผลการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมในรูปที่

4.23(จ) กรณี $V_{Z2} = 3.9 V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเอกสารได้ดำเนินการแก้ไขเอกสารฉบับนี้แล้ว เอกสารฉบับนี้จะไม่มีการแก้ไขอีกต่อไป และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.51 ผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ที่วัดได้มีค่าประมาณ $2.615 \text{mV}/^\circ\text{C}$ ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -60°C ถึง -160°C เริ่มต้นแรงดันเอาต์พุตที่ 1.0V ที่อุณหภูมิ -60°C และมี $\Delta V_{out} / \Delta T$ มากกว่าวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out} ในหัวข้อที่ 4.3.8 อยู่ประมาณ 20.75 เท่า

ทำการทดลองการทำงานในรูปที่ 4.41(จ) โดยกำหนดให้ V_{CC} มีค่าประมาณ 6.95V และกำหนดความต้านทาน $R_{out} = 40\ \Omega$ เพื่อให้กระแส $I_D \approx I_{DZ} \approx 20\text{mA}$ ซึ่งค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับเงื่อนไขในการออกแบบหาค่า V_{CC} และ R_{out} ในหัวข้อที่ 4.3.2 และใช้ซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 5229 แรงดันพังทลาย $4.3\ \text{V}$ กับซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 5231 แรงดันพังทลาย $5.1\ \text{V}$ ซึ่งเป็นแรงดันอ้างอิงโดยผลที่ได้จากการวัดจริงจากมัลติมิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.52



รูปที่ 4.52 ผลการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมในรูปที่ 4.23(จ) กรณี $V_{Z2} = 4.3\ \text{V}$

จากรูปที่ 4.52 ผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ที่วัดได้มีค่าประมาณ $2.395 \text{mV}/^\circ\text{C}$ ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -60°C ถึง -160°C เริ่มต้นแรงดันเอาต์พุตที่ 0.611V ที่อุณหภูมิ -60°C และมี $\Delta V_{out} / \Delta T$ มากกว่าวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out} ในหัวข้อที่ 4.3.8 อยู่ประมาณ 19.0 เท่า

ซึ่งจากผลการทดลองนี้ทำให้เห็นถึงย่านการทำงานเมื่อทำการทดสอบกับวงจรรวม ดังนั้นผลของ R_{out} และผลของ Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 จึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการกำหนดช่วงทดสอบอุณหภูมิ ตั้งแต่ผลในช่วงอุณหภูมิมระหว่าง -60°C ถึง -160°C มีความเป็นเชิงเส้นที่ดี จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน

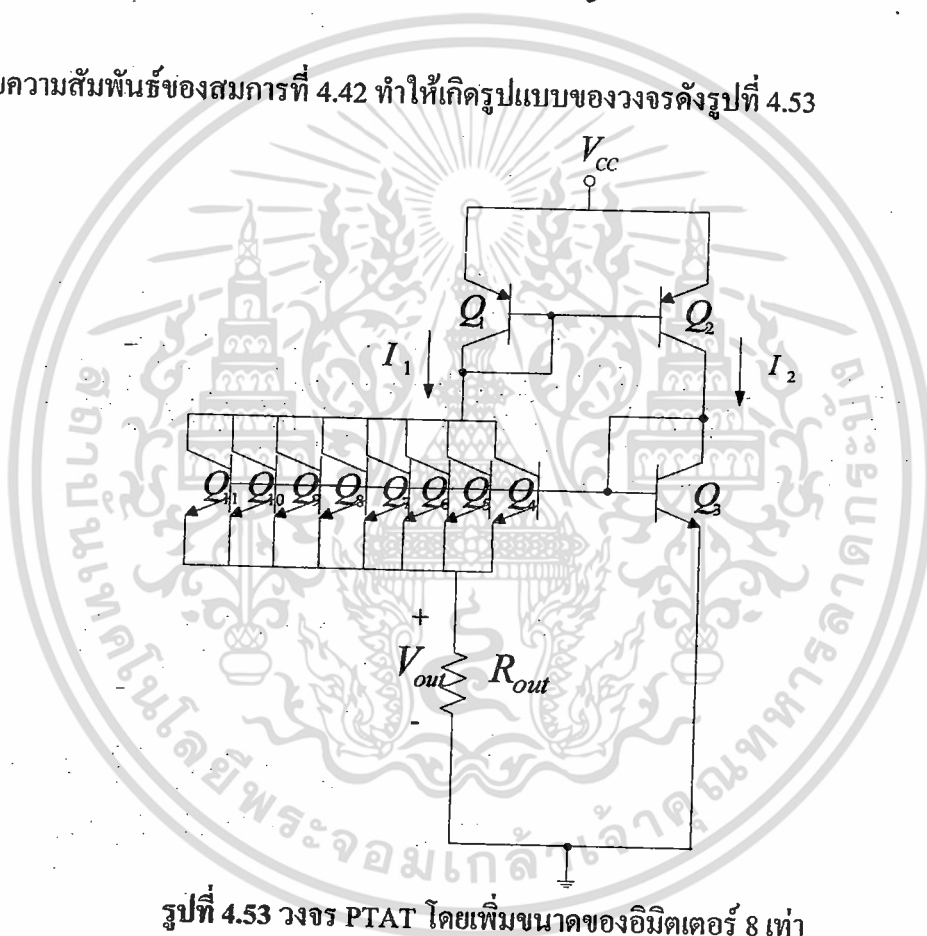
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อวงจร PTAT โดยการเพิ่มพื้นที่ของอิมิตเตอร์เป็น 8 เท่า

การศึกษาในหัวข้อที่ 4.5 ต้องการนำเสนอตัวอย่างหนึ่งที่ได้ทำการวิเคราะห์แล้วโดยนำสมการที่ 4.42 มาทำการสร้าง มุ่งเน้นถึงการพัฒนางจร PTAT เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิเป็นหลัก

$$V_R = \frac{kT}{e} \ln 8 \quad (4.42)$$

โดยความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.42 ทำให้เกิดรูปแบบของวงจรดังรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.53 วงจร PTAT โดยเพิ่มขนาดของอิมิตเตอร์ 8 เท่า

สามารถพิสูจน์ V_R หรือ V_{out} ได้ดังสมการที่ 4.43

$$V_{out} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_2}{I_{S3}} \times \frac{I_{S4} + I_{S5} + \dots + I_{S11}}{I_1} \right) \quad (4.43)$$

ถ้ากำหนดให้เงื่อนไขในการออกแบบให้ $I_1 = I_2$ และ $I_S = I_{S3, S4, \dots, S11}$ แทนในสมการที่

4.43 จะได้ดังสมการที่ 4.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการ (4.44)

$$V_{out} = \frac{kT}{q} \ln(8) \quad (4.44)$$

สังเกตเห็นว่าจะนำมาสร้างเป็นความสัมพันธ์ของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ จะได้คังสมการที่ 4.45

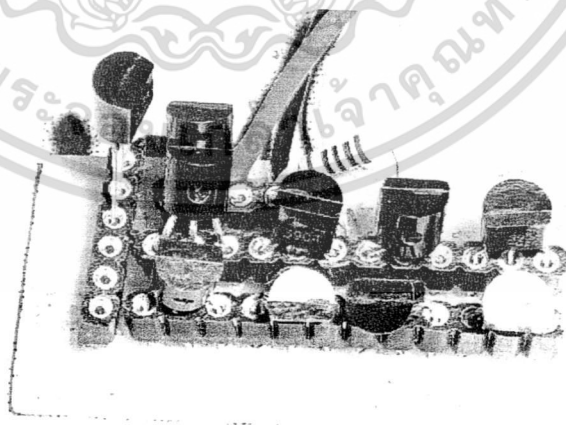
$$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta T} = \frac{k}{q} \ln(8) \quad (4.45)$$

หรือมีผลตอบสนองต่ออุณหภูมิประมาณ 2 เท่าเมื่อเปรียบกับวงจร PTAT แบบปกติ

โดยงานวิจัยนี้ได้นำวงจร 4.53 มาทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวงจร PTAT โดยการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างพื้นที่อิมิตเตอร์เป็น 8 เท่าระหว่างผลการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Pspice และการวัดจริง และใช้ในการเปรียบเทียบกับวงจรที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้เห็นถึงข้อจำกัดและการพัฒนาใหม่ให้ดีขึ้น

4.5.1 การทดลองผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อวงจร PTAT โดยการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของอิมิตเตอร์เป็น 8 เท่า

จากโครงสร้างของวงจร PTAT โดยการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของอิมิตเตอร์เป็น 8 เท่าในรูปที่ 4.53 นำมาสร้างเป็นวงจรต้นแบบดังรูปที่ 4.54 โดยกำหนดให้ Q_1 และ Q_2 ใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด PNP เบอร์ 2N3906 และ Q_3, Q_4, \dots, Q_{11} ใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN เบอร์ 2N3904 กำหนดให้ $R_{out} = 100\Omega$ โดยนำมาทดสอบกับชุดทดสอบคุณสมบัติที่ขึ้นกับอุณหภูมิในหัวข้อที่ 3.3

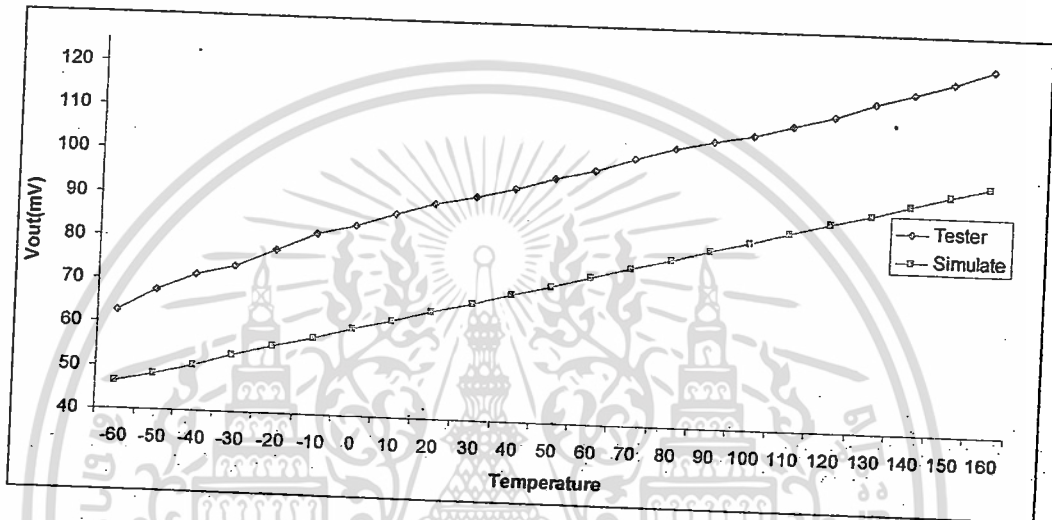


รูปที่ 4.54 วงจร PTAT โดยเพิ่มขนาดพื้นที่ของอิมิตเตอร์ 8 เท่าที่พร้อมจะทดสอบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อวงจร PTAT โดยการเพิ่มของพื้นที่อิมิตเตอร์ เป็น 8 เท่าระหว่างผลการจำลองการทำงานและการวัดจริง

ทำการทดลองการทำงานในรูปที่ 4.54 โดยกำหนดให้ V_{CC} มีค่าประมาณ 2.5V และ กำหนดความต้านทาน $R_{out} = 100\Omega$ โดยผลที่ได้จากการวัดจริงจากมัลติมิเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.55



องศาเซลเซียส $^{\circ}C$

รูปที่ 4.55 ผลการวัดผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมในรูปที่ 4.54

จากรูปที่ 4.55 ผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ที่วัดได้มีค่าประมาณ $0.23 \text{ mV}/^{\circ}C$ ในช่วงอุณหภูมิ ระหว่าง $-60^{\circ}C$ ถึง $-160^{\circ}C$ เริ่มต้นแรงดันเอาต์พุตที่ 62.7 mV ที่อุณหภูมิ $-60^{\circ}C$

ซึ่งจากผลการทดลองนี้ทำให้เห็นถึงข้อจำกัดของย่านการทำงานที่แคบลงเมื่อทำการ ทดสอบกับวงจรรวม ดังนั้นผลของ R_{out} และผลของ Q_1, Q_2, \dots, Q_{11} จึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญใน การกำหนดช่วงทดสอบอุณหภูมิ วงจรนี้สามารถทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิระหว่าง $-20^{\circ}C$ ถึง $160^{\circ}C$ เพราะมีความเป็นเชิงเส้น จึงเป็นวงจรในการนำมาใช้งานอีกแบบหนึ่ง โดยเฉพาะในกรณี ที่ต้องการแหล่งจ่ายแรงดันต่ำ แต่ข้อจำกัดที่ให้คือผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ มีความไวต่ำลง

4.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในหัวข้อที่ 4.5 เป็นการนำผลการจำลองการทำงาน (Simulate) และการทดลอง (Tester) ในหัวข้อที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 เพื่อมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล โดยจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ การเปรียบเทียบผล $\Delta V / \Delta T$ ของแต่ละอุปกรณ์ การเปรียบเทียบผล $\Delta V / \Delta T$ ขณะที่รอยต่อพี-เอ็นกับรอยต่อซีเนอร์และรอยต่อซีเนอร์แรงดันพังทลายตั้งแต่ 3.3V ถึง 4.3V กับซีเนอร์ไดโอด อยู่ในชุดกำเนิดอุณหภูมิ โดยให้แหล่งจ่ายกระแส PTAT อยู่ภายนอก กำหนดวงจรที่ใช้ดังรูปที่ 4.41 เพื่อใช้ศึกษาผลของ $\Delta V / \Delta T$ ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของรอยต่อพี-เอ็น และย่านการทำงานของวงจรเป็นหลัก

การเปรียบเทียบผล $\Delta V / \Delta T$ ของวงจรรวม ในขณะที่ใช้รอยต่อพี-เอ็นกับรอยต่อซีเนอร์และรอยต่อซีเนอร์แรงดันพังทลายตั้งแต่ 3.3V ถึง 4.3V กับซีเนอร์ไดโอด อยู่ในชุดกำเนิดอุณหภูมิ โดยกำหนดให้วงจรรวมรูปที่ 4.41 อยู่ในบรรยากาศเดียวกันทั้งหมด เพื่อศึกษาผล $\Delta V / \Delta T$ ย่านการทำงานของวงจร รวมถึงผลของทรานซิสเตอร์และความต้านทาน R_{out} และหัวข้อสุดท้ายเป็นการสรุปผล $\Delta V / \Delta T$ ของแต่ละวงจร เริ่มต้นจากวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out} วงจร PTAT โดยการเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่ของอิมิตเตอร์เป็น 8 เท่า และวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์ที่ให้ $\Delta V / \Delta T$ มีค่าสูงสุด ซึ่งเป็นหัวข้อหลักสำหรับโครงการนี้

4.6.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการวัดจริงของอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่ออุณหภูมิของอุปกรณ์แต่ละชนิด

นำผลจากตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.5 มาทำการเปรียบเทียบผลแสดงดังตารางที่ 4.8 โดยผลที่ได้มีความผิดพลาดสูงสุดคือ ZD1 ซึ่งเป็นการมีแรงดันพังทลาย 3.3 V เนื่องจากการทดลองจริงมีค่าลดลงพอสมควร

ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการทดสอบจริงของซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N5229 ถึง 1N5231

ZDn	เบอร์	V_z	$\Delta V_z / \Delta T$ (mV/°C)		%ความผิดพลาด
			ผลการจำลองการทำงาน	ผลการวัดจริง	
ZD1	1N5226	3.3V	-2.732	-1.4	48.75
ZD2	1N5227	3.6V	-2.076	-1.36	34.48
ZD3	1N5228	3.9V	-1.576	-1.25	20.68
ZD4	1N5229	4.3V	-1.018	-1.13	11
ZD5	1N5231	5.1V	0.862	1	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารลับในวงจำกัดการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ตามการที่ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าในการทดลองจริง รอยต่อซีเนอร์ให้ผลตอบสนอง $\Delta V_z / \Delta T$ เป็นเชิงเส้นและทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -60°C ถึง -160°C

นำผลของตารางที่ 4.4 และที่ 4.6 มาทำการเปรียบเทียบผลแสดงดังตารางที่ 4.9 โดยผลที่ได้เมื่อนำเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงาน มีค่ามากที่สุดที่ $n=3$ อยู่ประมาณ 18% ความผิดพลาดสูงสุดที่ $n=4$ ทั้งนี้ในความเป็นจริงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ หรือ IN4152 ที่หาซื้อได้ทั่วไป ไม่สามารถระบุให้พารามิเตอร์ของรอยต่อพี-เอ็น ที่ $n=1, 2, 3$ และ 4 มีค่าเหมือนกันหมดได้ ส่งผลให้เมื่อนำรอยต่อทั้ง 4 มาอนุกรม จาก $n=1, 2, 3$ และ 4 ย่อมมีความคลาดเคลื่อนได้ เป็นผลให้เมื่อ และเมื่อนำผลการวัดที่ได้มาแทนในสมการที่ 4.40 เช่น $n=2$ จะได้ค่า $\Delta V / \Delta T = (4)(-1.4\text{mV}/^\circ\text{C}) = 2.7\text{mV}/^\circ\text{C}$ ซึ่งมีผลตรงกับการวัดและด้วยเหตุผลนี้เองจึงนำผลดังกล่าวมาทำการออกแบบในหัวข้อที่ 4.5.2 และ 4.5.3

ตารางที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการทดสอบจริงของรอยต่อพี-เอ็นอนุกรมตั้งแต่ 1 ถึง 4

N	$\Delta V_D / \Delta T$ (mV/°C)		%ความผิดพลาด
	ผลการจำลองการทำงาน	ผลการวัดจริง	
1	-1.40	-1.38	1.43
2	-2.70	-2.70	0
3	-3.90	-3.87	0.77
4	-5.60	-4.59	18.03

ในผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าในการทดลองจริง รอยต่อพี-เอ็นให้ผลตอบสนอง $\Delta V_D / \Delta T$ เป็นเชิงเส้นและทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -60°C ถึง 160°C

นำผลของหัวข้อที่ 4.3.3 และ 4.3.6 มาทำการเปรียบเทียบผลแสดงดังตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเปรียบเทียบจากผลการจำลองการทำงานมีค่าประมาณ 33% ซึ่งมีค่าค่อนข้างมาก เป็นผลมาจากอุปกรณ์ในการทดลองเช่น ผล β ของทรานซิสเตอร์ของแต่ละตัวไม่เท่ากัน การส่งผ่านความร้อนระหว่างอุปกรณ์ที่ไม่เท่ากัน เป็นผลให้กระแสที่ไหลผ่านไม่เท่ากัน ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่าความต้านทาน ทำให้ค่าที่อุณหภูมิตั้งแต่ -60°C ถึง -160°C มีค่าความชันเกิดขึ้นไม่ค่อยเป็นเชิงเส้นเท่าที่ควร ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงโดยเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุตต่ออุณหภูมิ หรือ $\Delta V_{out} / \Delta T$ มีค่าต่างกันมาก

ไม่ทราบแน่ชัดว่าทำไมถึงเกิดเช่นนี้ อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการทดสอบจริงวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out}

วงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out}	$\Delta V_{out} / \Delta T (mV) / ^\circ C$	
	ผลการจำลองการทำงาน	ผลการวัด
	0.09	0.12

ในผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าในการทดลองจริงวงจร PTAT อนุกรมกับ R_{out} ผลตอบสนอง $\Delta V_{out} / \Delta T$ เป็นเชิงเส้นและทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ $-60^\circ C$ ถึง $160^\circ C$

4.6.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการวัดจริงของอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันเอาต์พุตต่ออุณหภูมิของวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์และรอยต่อพี-เอ็น อนุกรม n รอยต่อกำหนดให้ $n = 1, 2, 3, 4$

จากผลการทดลองที่ได้ในหัวข้อที่ 4.3.3 และหัวข้อ 4.3.6 เมื่อนำผลการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันเอาต์พุตต่ออุณหภูมิหรือ $\Delta V_{out} / \Delta T$ มาเปรียบเทียบ ผลปรากฏว่าในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็นอนุกรมเพิ่มเข้าไปที่ละรอยต่อ ให้ผล $\Delta V_{out} / \Delta T$ มากกว่าวงจรที่ใช้รอยต่อพีเอ็น 1 รอยต่อเดิม แต่ระดับแรงดันเอาต์พุตมีขนาดลดลงดังรูปที่ 4.53 และสามารถพิสูจน์ได้จากสมการที่ (4.4 ก) ที่ว่า

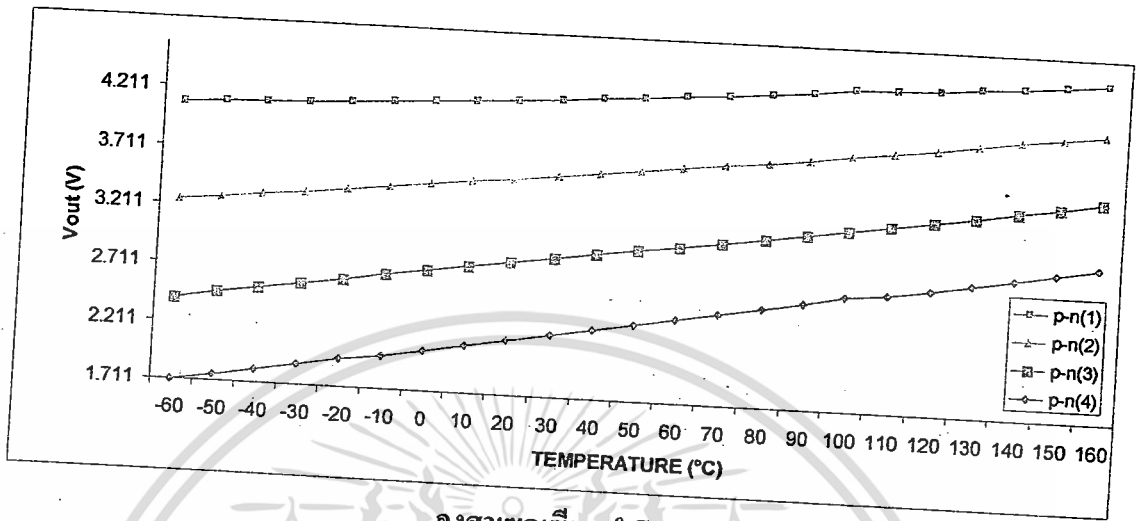
$$V_{OUT} = V_{BE3} - V_{BE4} - nV_D + V_Z$$

ถ้ากำหนดให้ $V_{PTAT} = V_{BE3} - V_{BE4}$ จะได้ดังสมการที่ (4.42)

$$V_{OUT} = V_{PTAT} - V_{BE4} - nV_D + V_Z \tag{4.42}$$

ดังนั้นหากพิจารณา n เพียงอย่างเดียวจะทำให้เห็นว่าเมื่อ n มีค่ามากขึ้นย่อมส่งผลให้ V_{out} ลดลง เมื่อพิจารณาที่ใช้รอยต่อซีเนอร์ไดโอดเบอร์เดียวกัน ใช้โครงสร้างของวงจร PTAT เหมือนกัน และจากผลการวัดเฉพาะรอยต่อซีเนอร์และรอยต่อพี-เอ็นให้อยู่ภายในเครื่องควบคุมอุณหภูมิในบรรยากาศเดียวกัน ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่งผลสำหรับรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์ในรูปที่ 4.41 โดยแหล่งจ่ายกระแสที่อยู่ในรูป 4.41 นั้นจะมีอุณหภูมิกงที่ที่อุณหภูมิห้องตลอดการทดสอบ ผลการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่ได้ในรูปที่ 4.53 จึงมีความเป็นเชิงเส้นสูง และย่านการทำงานอยู่ที่อุณหภูมิระหว่าง $-60^\circ C$ ถึง $160^\circ C$ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวทำให้เห็นว่าตัวพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความไม่เป็นเชิงเส้นและย่านการทำงานของอุณหภูมิลดลงเกิดจากผลจากอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร เช่น ทรานซิสเตอร์ และชนิดของความต้านทานเป็นปัจจัยสำคัญ

โดยผลจากตารางที่ 4.11 ทำให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเปรียบเทียบจากผลการจำลองการทำงานมีค่าน้อยมาก หรือสูงสุดอยู่ที่ 8.3%



องศาเซลเซียส °C

รูปที่ 4.56 ผลการเปรียบเทียบการวัดผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ระหว่างรูปที่ 4.41(ก) - 4.41(ง)

ตารางที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการทดสอบจริงของวงจร PTAT ใช้รอยต่อซีเนอร์และรอยต่อพี-เอ็น อนุกรม n รอยต่อกำหนดให้ n = 1,2,3,4 ดังวงจรในรูปที่ 4.41(ก) - 4.41(ง)

N	$\Delta V_{out} / \Delta T$ (mV)		%ความผิดพลาด
	ผลการจำลองการทำงาน	ผลการวัด	
1	2.444	2.3	5.9
2	3.864	4.185	8.3
3	5.133	5.29	3.05
4	6.195	5.95	3.96

4.6.3 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการวัดจริงของอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันเอาต์พุตต่ออุณหภูมิของวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์และรอยต่อซีเนอร์ที่ระดับแรงดันพียงหลายตั้งแต่ 3.3 V ถึง 4.3 V

จากผลการทดลองที่ได้ในหัวข้อที่ 4.3.2 และหัวข้อ 4.3.5 เมื่อนำผลการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันเอาต์พุตต่ออุณหภูมิหรือ $\Delta V_{out} / \Delta T$ มาเปรียบเทียบ ผลปรากฏว่าในกรณีที่รอยต่อซีเนอร์ที่ระดับแรงดันพียงหลายตั้งแต่ 3.3 V ถึง 4.3 V ให้ผล $\Delta V_{out} / \Delta T$ เพิ่มขึ้นจากวงจรที่ใช้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

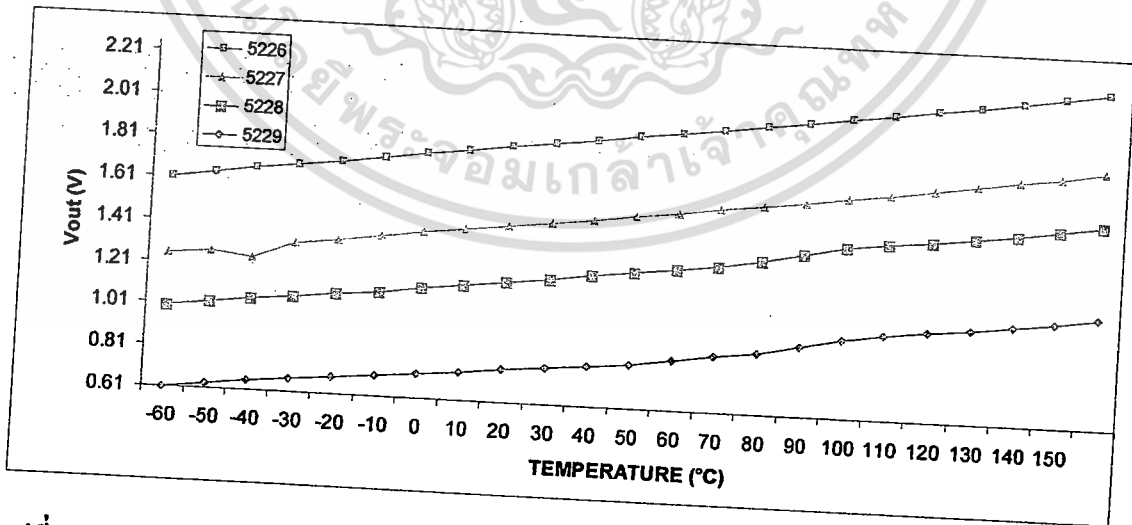
รอยต่อซีเนอร์ที่ระดับแรงดันพังทลาย 4.3 V เมื่อเปลี่ยนระดับแรงดันพังทลายเป็น 3.3 V แต่ระดับแรงดันเอาต์พุตมีขนาดลดลงดังรูปที่ 4.54 และสามารถพิสูจน์ได้จากสมการที่ (4.4) ที่ว่า

$$V_{OUT} = V_{BE3} - V_{BE4} - V_{Z2} + V_{Z1}$$

ถ้ากำหนดให้ $V_{PTAT} = V_{BE3} - V_{BE4}$ จะได้สมการที่ (4.43)

$$V_{OUT} = V_{PTAT} - V_{Z2} + V_{Z1} \tag{4.43}$$

ดังนั้นหากพิจารณา n เพียงอย่างเดียวจะทำให้เห็นว่าเมื่อ n มีค่ามากขึ้นย่อมส่งผลให้ V_{out} ลดลง เมื่อพิจารณาที่ใช้รอยต่อซีเนอร์ไดโอดเบอร์เดียวกัน ใช้โครงสร้างของวงจร PTAT เหมือนกัน และจากผลการวัดเฉพาะรอยต่อซีเนอร์และรอยต่อพี-เอ็นให้อยู่ภายในเครื่องควบคุมอุณหภูมิในบรรยากาศเดียวกัน ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่งผลสำหรับรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์ในรูปที่ 4.41 โดยแหล่งจ่ายกระแสที่อยู่ในรูป 4.41 นั้นจะมีอุณหภูมิคงที่ที่อุณหภูมิห้องตลอดการทดสอบ ผลการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่ได้ในรูปที่ 4.54 จึงมีความเป็นเชิงเส้นสูง และย่านการทำงานอยู่ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -60°C ถึง 160°C ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวทำให้เห็นว่าตัวพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความไม่เป็นเชิงเส้นและย่านการทำงานของอุณหภูมิลดลงเกิดจากผลจากอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร เช่น ทรานซิสเตอร์ และชนิดของความต้านทานเป็นปัจจัยสำคัญ โดยผลจากตารางที่ 4.11 ทำให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเปรียบเทียบจากผลการจำลองการทำงานมีค่าน้อยมาก หรือสูงสุดอยู่ที่ 24.6%



รูปที่ 4.57 ผลการเปรียบเทียบการวัดผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ของวงจร PTAT ขณะปรับระดับแรงดันพังทลายตั้งแต่ 3.3 V ถึง 4.3V ดังวงจรในรูปที่ 4.41(จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการทดสอบจริงของวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์กับซีเนอร์ ที่ระดับแรงดันตั้งแต่ 3.3V ถึง 4.3V ดังวงจรในรูปที่ 4.41

(จ)

ZDn	$\Delta V_{out} / \Delta T$ (mV)		%ความผิดพลาด
	ผลการจำลองการทำงาน	ผลการวัดจริง	
1N5226	3.0891	2.67	13.57
1N5227	2.824	2.644	6.37
1N5228	2.378	2.615	9.96
1N5229	1.9222	2.395	24.6

4.6.4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการวัดจริงของอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตต่ออุณหภูมิของแต่ละวงจร ในกรณีรอยต่อซีเนอร์และรอยต่อพี-เอ็น อนุกรม n รอยต่อกำหนดให้ $n = 1, 2, 3, 4$

จากผลการทดลองที่ได้ในหัวข้อที่ 4.3.8, 4.4.3 และ 4.4.2 เมื่อนำมาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตต่ออุณหภูมิ หรือ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ที่ได้ ผลปรากฏว่าวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์กับรอยต่อพี-เอ็นอนุกรม 1, 2, 3, 4 รอยต่อ ในหัวข้อที่ 4.4.3 มีค่า $\Delta V_{out} / \Delta T$ มากกว่าวงจร 4.4.2 เดิมอยู่ 49.58 เท่า และยังคงความเป็นเชิงเส้นที่เป็นลักษณะเด่นของวงจร PTAT เช่นเดียวกับวงจรในหัวข้อที่ 4.3.8 และ 4.4.2 แต่ข้อจำกัดของหัวข้อที่ 4.4.3 คือใช้แหล่งจ่ายแรงดันที่สูงกว่าเดิมถึง 2.2 เท่า ซึ่งผลที่ได้มีค่ามากกว่าวงจรในหัวข้อที่ 4.3.8 และ 4.4.2 หลายเท่าตัว โดยผลสรุปทั้งหมดที่กล่าวมาแสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการทดสอบจริงของวงจร PTAT ของแต่ละวงจร

	$\Delta V_{out} / \Delta T$ (mV)		อัตราเท่า	%ความผิดพลาด
	ผลการจำลองการทำงาน	ผลการวัด		
PTAT	0.09	0.12	0	33.33
1 รอยต่อ	2.444	2.3	19.16	8
2 รอยต่อ	3.864	4.18	34.83	9.42
3 รอยต่อ	5.133	5.67	44.08	13.68
4 รอยต่อ	6.195	5.95	49.58	4.20

หมายเหตุ อัตราเท่าหมายถึงผลตอบสนองต่อความไวผลหรือ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ที่ได้จากการวัดจากการวัดผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ของวงจร PTAT อนุกรมกับโหลดความต้านทานในหัวข้อที่ 4.3.8

4.6.5 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการวัดจริงของอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตต่ออุณหภูมิของแต่ละวงจร ในกรณีรอยต่อซีเนอร์และรอยต่อซีเนอร์ที่ระดับแรงดันพียงหลายตั้งแต่ 3.3 V ถึง 4.3 V

จากผลการทดลองที่ได้ในหัวข้อที่ 4.3.8, 4.4.3 และ 4.4.2 เมื่อนำมาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตต่ออุณหภูมิ หรือ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ที่ได้ ผลปรากฏว่าวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์กับรอยต่อซีเนอร์ที่ระดับแรงดันพียงหลายตั้งแต่ 3.3 V ถึง 4.3 V ในหัวข้อที่ 4.4.3 มีค่า $\Delta V_{out} / \Delta T$ มากกว่าวงจร 4.4.2 เดิมอยู่ 22.25 เท่า และยังคงความเป็นเชิงเส้นที่เป็นลักษณะเด่นของวงจร PTAT เช่นเดียวกับวงจรในหัวข้อที่ 4.3.8 และ 4.4.2 แต่ข้อจำกัดของหัวข้อที่ 4.4.3 คือใช้แหล่งจ่ายแรงดันที่สูงกว่าเดิมถึง 2.2 เท่า ซึ่งผลที่ได้มีค่ามากกว่าวงจรในหัวข้อที่ 4.3.8 และ 4.4.2 หลายเท่าตัว โดยผลสรุปทั้งหมดที่กล่าวมาแสดงในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการทำงานและการทดสอบจริงของวงจร PTAT ของแต่ละวงจร

	$\Delta V_{out} / \Delta T$ (mV)		อัตราเท่า	%ความผิดพลาด
	ผลการจำลองการทำงาน	ผลการวัด		
PTAT	0.09	0.12	0	33.33
1N5226	3.089	2.67	22.25	5.95
1N5227	2.824	2.644	22.03	6.61
1N5228	2.378	2.615	21.79	10.33
1N5229	1.922	2.395	19.96	6.44

หมายเหตุ อัตราเท่าหมายถึงผลตอบสนองต่อความไวผลหรือ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ที่ได้จากการวัดจากการวัดผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ของวงจร PTAT อนุกรมกับโหลดความต้านทานในหัวข้อที่ 4.3.8

และจากความสัมพันธ์นี้เองเมื่อนำผลของหัวข้อที่ 4.3.8 และ 4.4.2 มาทำการเปรียบเทียบผลหลังจากเพิ่มอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของอิมิตเตอร์เป็น 8 เท่า ผลที่ได้คือ $\Delta V_{out} / \Delta T$ มีค่ามากกว่าเดิม 2.52 เท่า หากทำการพิจารณาเพื่อหาอัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง V_{out} ในหัวข้อที่ 4.4.2 และ 4.3.8 จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในพิธีการเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_{OUT(4.4.2)}}{V_{OUT(4.3.8)}} = \frac{kT/q \ln 8 \cdot \ln 8}{kT/q \ln 2 \cdot \ln 8} = 3$$

เมื่อกำหนดให้ $I_1 = I_2$ และ $I_S = I_{S3,S4,\dots,S11}$ และอยู่ในบรรยากาศและเงื่อนไขเดียวกันทั้งหมด

ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณจะนำไปใช้ในการหาความหนาจะเป็นที่เกิดขึ้น เนื่องจากในความเป็นจริงแล้ว $I_1 \neq I_2$ และ $I_S \neq I_{S3,S4,\dots,S11}$ โดยผลสรุปทั้งหมดที่กล่าวมาแสดงในตารางที่ 4.13 และ 4.14

4.6.6 ผลการเปรียบเทียบค่าการจำลองการทำงานของแรงดันต่ออุณหภูมิกับสมการที่ (4.44)

ทำการเปรียบเทียบผลระหว่าง $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากการจำลองการทำงานและการวัดจริงกับผลรวมของสมการที่ (4.44) ที่ว่า

$$\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(out)} = \left(\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(PTAT)} + \left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(Zener)} \right) - n \left(\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(P-N)} \right) \quad (4.44)$$

เพื่อพิสูจน์ว่าสมการที่ 4.44 ใช้ได้จริง โดยกำหนดให้ผลของ PTAT นำมาจากตารางที่

4.10 ผลของ Zener นำมาจากตารางที่ 4.8 และ ผลของ P-N นำมาจากตารางที่ 4.9 โดยผลที่ได้นำมาแทนในตารางที่ 4.15 ถึง 4.18

พิจารณาในส่วนของการจำลองการทำงาน นำผล $\Delta V / \Delta T$ ของแต่ละอุปกรณ์มาแทนในความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.44 ผลจากการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.15 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากผลการจำลองการทำงานในตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.12 ผลของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเปรียบเทียบกับ $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากวงจรที่กำหนดในตารางที่ 4.15 จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 6.18% ซึ่งจัดได้ว่ามีค่าน้อยมาก

ตารางที่ 4.15 ผลการเปรียบเทียบระหว่าง $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากการคำนวณในสมการที่ 4.44 และจากการจำลองการทำงานโดยใช้เงื่อนไขของวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์และรอยต่อพี-เอ็น อนุกรม n รอยต่อกำหนดให้ $n = 1, 2, 3, 4$

N	$\Delta V / \Delta T$ (mV/°C)				
	ผลจากการคำนวณ $\Delta V_{out} / \Delta T$	ผลการจำลองการทำงาน			
		ตารางที่ 4.11	PTAT	Zener (1N5231)	P-N
1	2.458	2.444	0.09	0.862	-1.506
2	3.965	3.864	0.09	0.862	-3.013
3	5.471	5.133	0.09	0.862	-4.915
4	6.978	6.195	0.09	0.862	-6.026

หมายเหตุ ผลจากตารางที่ 4.11 คือผล $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากการจำลองการทำงาน และ n คือจำนวนรอยต่อพี-เอ็น

พิจารณาในส่วนของการจำลองการทำงาน นำผล $\Delta V / \Delta T$ ของแต่ละอุปกรณ์มาแทนในความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.44 ผลจากการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.16 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากผลการจำลองการทำงานในตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.12 ผลของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเปรียบเทียบกับ $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากวงจรที่กำหนดในตารางที่ 4.16 จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 16.15% ซึ่งจัดได้ว่ามีค่าน้อยมาก

ตารางที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบระหว่าง $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากการคำนวณในสมการที่ 4.44 และจากการจำลองการทำงานโดยใช้เงื่อนไขของวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์และรอยต่อซีเนอร์ระดับแรงดันพังหลายตั้งแต่ 3.3 V ถึง 4.3 V

V_{Zn}	$\Delta V / \Delta T$ (mV/°C)				
	ผลคำนวณสมการ 4.44 $\Delta V_{out} / \Delta T$	ผลการจำลองการทำงาน			
		ตารางที่ 4.12	PTAT	Zener (1N5231)	Zener ซ้ำ
1N5226	3.684	3.089	0.09	0.862	-2.732
1N5227	3.028	2.824	0.09	0.862	-2.076
1N5228	2.527	2.378	0.09	0.862	-1.575
1N5229	1.969	1.922	0.09	0.862	-1.017

หมายเหตุ ผลจากตารางที่ 4.12 คือผล $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากการจำลองการทำงาน และ V_{Zn} คือจำนวน g เบอร์ของซีเนอร์ไดโอด เช่น 1N5229 = 4.3V

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าโปรแกรม PSpice ใช้หลักการเดียวกับสมการที่ 4.44 ในการหาผล $\Delta V_{out} / \Delta T$ ของวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์และรอยต่อพี-เอ็น อนุกรม n รอยต่อกำหนดให้ $n = 1, 2, 3, 4$ รวมถึงวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์และรอยต่อซีเนอร์ระดับแรงดันพังทลายตั้งแต่ 3.3 V ถึง 4.3 V ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และ 4.12

พิจารณาในส่วนของการทดลอง นำผลการวัด $\Delta V / \Delta T$ ของแต่ละอุปกรณ์มาแทนในความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.44 ผลจากการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.17 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากการวัดในตารางที่ 4.11 ผลของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเปรียบเทียบกับ $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากวงจรที่กำหนดในตารางที่ 4.15 จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 11.22% ซึ่งผลที่ได้เกิดจากค่าเฉลี่ย $\Delta V / \Delta T$ ของแต่ละอุปกรณ์ ทำให้ผลรวมที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อน

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าผลรวมของวงจรสามารถใช้หลักการของสมการที่ 4.44 ในการคาดคะเน เพื่อหาผล $\Delta V_{out} / \Delta T$ ของวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์และรอยต่อพี-เอ็น อนุกรม n รอยต่อกำหนดให้ $n = 1, 2, 3, 4$ ดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบระหว่าง $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากการคำนวณในสมการที่ 4.44 และจากการวัดจริง โดยใช้เงื่อนไขของรอยต่อซีเนอร์และรอยต่อพี-เอ็น อนุกรม n รอยต่อกำหนดให้ $n = 1, 2, 3, 4$

V_{Zn}	$\Delta V / \Delta T$ (mV/°C)				
	ผลคำนวณสมการ 4.44	ผลการวัดจริง			
	V_{out}	ผลตารางที่	PTAT	Zener (1N5231)	P-N
1	2.5	2.3	0.12	1	-1.38
2	3.82	4.18	0.12	1	-2.70
3	4.99	5.67	0.12	1	-3.87
4	5.71	5.95	0.12	1	-4.59

หมายเหตุ ผลจากตารางที่ 4.11 คือผล $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากการจำลองการทำงาน และ n คือจำนวน รอยต่อพี-เอ็น

พิจารณาในส่วนของการทดลอง นำผลการวัด $\Delta V / \Delta T$ ของแต่ละอุปกรณ์มาแทนในความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.44 ผลจากการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.18 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากการวัดในตารางที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเปรียบเทียบกับ $\Delta V_{out} / \Delta T$

จากวงจรที่กำหนดในตารางที่ 4.16 จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 13.68% ซึ่งผลที่ได้เกิดจากเฉลี่ยค่า $\Delta V / \Delta T$ ของแต่ละอุปกรณ์ ทำให้ผลรวมที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อน

ตารางที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบระหว่าง $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากการคำนวณในสมการที่ 4.44 และจากการวัดจริงโดยใช้เงื่อนไขของวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์และรอยต่อซีเนอร์ระดับแรงดันพียงหลายตั้งแต่ 3.3 V ถึง 4.3 V

V_{Zn}	$\Delta V / \Delta T$ (mV/°C)				
	ผลการคำนวณ	ผลการวัดจริง			
		V_{out}	ผลจากตารางที่	PTAT	Zener (1N5231)
1N5226	2.52	2.67	0.12	1	-1.40
1N5227	2.48	2.644	0.12	1	-1.36
1N5228	2.37	2.615	0.12	1	-1.25
1N5229	2.25	2.395	0.12	1	-1.13

หมายเหตุ ผลจากตารางที่ 4.12 คือผล $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากการจำลองการทำงาน และ V_{Zn} คือจำนวนเบอร์ดของซีเนอร์ไดโอด เช่น 1N5229 = 4.3V

ดังนั้นจากผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.15 และ ตารางที่ 4.16เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากผลการจำลองการทำงานในตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.12 ผลของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเปรียบเทียบ $\Delta V_{out} / \Delta T$ จากวงจรที่กำหนดในตารางที่ 4.15 และ 4.16 จะมีค่าสูงสุดที่ 0.94% ซึ่งจะมีค่าน้อยมาก จึงสามารถสรุปได้ว่าโปรแกรม Pspice ใช้หลักการเดียวกับสมการที่ (3.35) ในการหาผล $\Delta V_{out} / \Delta T$ ของวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์และรอยต่อพี-เอ็น อนุกรม n=1 ถึง 4 รวมถึงวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อซีเนอร์ขณะปรับระดับแรงดันพียงหลายตั้งแต่ 3.3 โวลต์ ถึง 5.1 โวลต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.15-4.18 ค่าของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ จะเห็นว่ามีค่าน้อยมากทำให้สามารถเขียนเงื่อนไขสมการใหม่ได้ว่า

$$\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(OUT)} = \left(\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(Zener 1)} \right) - \left(\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(P-N, Zener 2)} \right) \tag{4.45}$$

จากสมการที่ (4.45) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลของ $\Delta V_{out} / \Delta T$ ของแต่ละวงจรในหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4 มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดที่ 16.42% และจากสมการดังกล่าวทำให้เห็นว่าความไวของวงจร PTAT ด้วยไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นเกิดขึ้นจากผลของ $\Delta V_{Zener} / \Delta T$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบรรณารักษ์งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า และผลของ $n \Delta V_{P-N} / \Delta T$ เป็นหลัก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุป

สรุปผลการทดลอง

โครงงานฉบับนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติที่มีต่ออุณหภูมิของรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์มาใช้ในการเพิ่มความไวหรือ $\Delta V/\Delta T$ ของวงจร PTAT ให้สูงขึ้น จากผลความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่มีต่ออุณหภูมิของรอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์ โดยการเพิ่มรอยต่อพี-เอ็นอนุกรมเพิ่มเข้าไป n ตัว และการใช้รอยต่อซีเนอร์ที่ระดับแรงดันพังทลายค่าต่างๆ เทียบกับรอยต่อซีเนอร์ค่าอ้างอิง

สามารถอธิบายเป็นสมการจากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ว่า

$$\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(OUT)} = \left(\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(PTAT)} + \left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(ZENER2)} \right) - \left(n \left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(P-N,ZENER1)} \right)$$

จากสมการ $\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(OUT)}$ หรือความไวที่ได้จะขึ้นอยู่กับ $\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(ZENER2)}$ และ

$n \left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(P-N,ZENER1)}$ เพราะ $\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(PTAT)}$ มีค่าน้อยมากจากการทดลองในบทที่ 4 และจากค่าที่ได้มี

ค่ามากพอที่จะนำไปใช้งานกับอุปกรณ์แสดงผลต่อไปได้ จึงไม่จำเป็นต้องใช้วงจรขยายเหมือนวงจร PTAT เดิม

แต่ในการทดลองพบว่าค่าความต้านทานและทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์เป็นข้อจำกัดในการทดสอบ เนื่องจากทำให้ความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าลดลงเมื่อเทียบการทดสอบจริงกับการจำลองสถานการณ์มีค่าความผิดพลาดประมาณ 14 % ส่วนย่านการทำงานยังถือว่าสามารถใช้งานในช่วง -60°C ถึง 160°C ได้แม้จะมีค่า

$\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(OUT)}$ ลดลงก็ตาม

เพราะฉะนั้นหากต้องการความเป็นเชิงเส้นให้กับวงจร PTAT ที่ใช้รอยต่อพี-เอ็นและ

รอยต่อซีเนอร์ในการเพิ่มความไว $\left. \frac{\Delta V}{\Delta T} \right|_{(OUT)}$ จึงต้องคำนึงถึงทรานซิสเตอร์ที่มีย่านการทำงานเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงเส้นและความต้านทานที่มีผลต่ออุณหภูมิห้อง และจาก โครงสร้างวงจร PTAT ด้วยไดโอดแบบ รอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์ที่นำมาเสนอนี้ใช้งานได้ง่าย เนื่องจากมีเพียงแค่ 3 ซาคือ แหล่งจ่าย แรงดัน กราวด์ และเอาต์พุต สามารถพัฒนาเป็นวงจรรวมได้ รวมถึงนำมาประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการ การวงจรตรวจวัดอุณหภูมิที่ต้องการความเป็นเชิงเส้นสูงและให้ผลตอบสนองต่ออุณหภูมิสูงได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- 1 Slavko Amom, Danilo Vrtacnik, Drago Resnik, Dejan Krizaj, Uros Ajancic, Matej Mozek, "PTAT sensor Base on SJFETs", 10th Mediterranean Electrotechnical Conference, John Wiley & Sons Ltd, 2008
- 2 รศ. ดร. สมเกียรติ สุภเดช, เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์, พิมพ์ครั้งที่ 2, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, สิงหาคม 2547
- 3 ผศ. นภัทร วัจนเทพินทร์, การจำลองการทำงานวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยโปรแกรม PSpice, บริษัทสยามสปอร์ตซินดิเคท จำกัด, 1 กุมภาพันธ์ 2548
- 4 M.P.Timko, "A Two-Terminal IC Temperature transducer", IEEE Journal of solid-state circuits, December 1979.
- 5 S. M. Sze, **Physics of Semiconductor Devices**, 2nd ed., John Wiley & sons, 1981.
- 6 ผศ. ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พฤษภาคม 2544
- 7 Donal A. Naman, **Semiconductor Physics and Device**, 2nd ed., John Wiley & sons, 1981.
- 8 M. J. O. stutt, **Semiconductor and Semiconductor diodes Academic**, New York, 1966.
- 9 พรศิริ ทรงมาลัย เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล เอกราช รัตนอุดมพิสูทธิ์และจักรพงษ์ สุภเดช "การศึกษารอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์ที่มีผลต่ออุณหภูมิโดยใช้วงจร PTAT", วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 4, หน้า 31-36, ฉบับที่ 4, ธันวาคม 2550
- 10 Richard B. FAIR, "Zener and Avalnache Breakdown in As-Implanted Low-Volt SI n-p Junctions", IEEE Transaction on Electronic Devices Vol. ED-23, No 5, MAY 1976.
- 11 P. Songmalai, T. Phetchakul, W. Pengchan, E. Ratanaudomphisut and J. Supadech, "Study on temperature effect on p-n and Zener junction for PTAT temperature sensor", The Fifth International Conference in Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology(ECTI-CON2008), Thailand, PP.785-788, 14-17 May, 2008
- 12 พรศิริ ทรงมาลัย เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล เอกราช รัตนอุดมพิสูทธิ์และจักรพงษ์ สุภเดช การศึกษารอยต่อพี-เอ็นและรอยต่อซีเนอร์ที่มีผลต่ออุณหภูมิโดยใช้วงจร PTAT, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 4, หน้า 31-36, ฉบับที่ 4, ธันวาคม 2550
- 13 รศ. ดร. สมเกียรติ สุภเดช, เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ครั้งที่ 3, มิถุนายน 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 ชุดกำเนิดอุณหภูมิและชุดควบคุมที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 2 ทำการเทไนโตรเจนเหลวลงไปในชุดกำเนิดอุณหภูมิเพื่อทำให้อุณหภูมิลดต่ำ

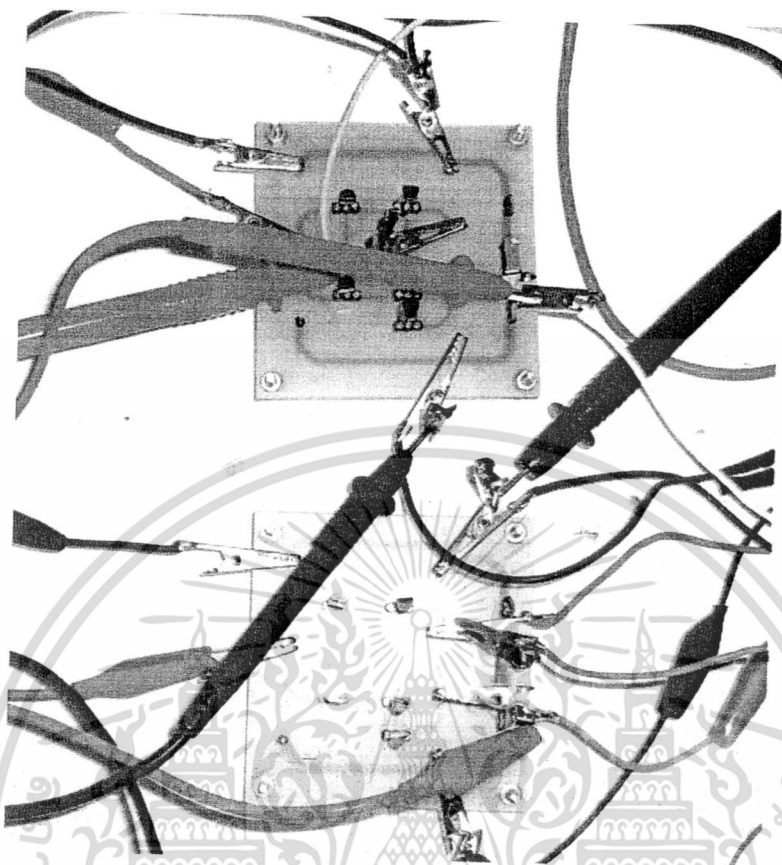
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 3 ทำการตั้งค่าชุดควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้อุณหภูมิตามต้องการในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 วงจรPTAT ที่ใช้ในการทดลองผลของรอยต่อพี-เอ็นและซีเนอร์



รูปที่ 5 ขณะทำการวัดแรงดันต่างๆ จากผลของรอยต่อพี-เอ็นและซีเนอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้