ปีการศึกษา 2532

เคิร์ฟเทรเซอร์

โดย

นาย ปุญญวัฒน์ พริ้งชะอุ่ม รหัส 291106
นาย ปรัชญา เสนทอง รหัส 291123

อาจารย์ที่ปรึกษา
อ. ประภากร สุวรรณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องเคิร์ฟเทรเซอร์

นาย ปุญญวัตน์ พริ้งชอุ่ม รหัส 291106
นาย ปรัชญา เสนทอง รหัส 291123

อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.ประภากร สุวรรณะ

บทคัดย่อ

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิด (Semiconducter Device) ย่อมจะมีคุณสมบัติและการทำงานเฉพาะตัวทั้งทางสแตติคส์และไดนามิกส์ (Static and Dynamic Characteristic)ซึ่งเราสามารถทราบคุณสมบัติเหล่านี้ได้โดยสองวิธีคือ

1. ดูจากแผ่นข้อมูล (Data Sheet) ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติของอุปกรณ์ของสารกึ่งตัวนำนั้นทั่วๆไปจากตัวอย่างที่แซมปลิ้ง (Sampling) มา
2. วัดโดยตรง ซึ่งจะได้ค่าคุณสมบัติของอุปกรณ์ตัวนั้นๆที่ต้องการ

Curve Tracer นี้เป็นเครื่องมือเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโดยใช้วิธีการตามข้อ 2. และได้ดัดแปลงปรับปรุงเพื่อให้ใช้ได้ง่ายสดวกและรวดเร็ว

หลักการทำงานของ Curve Tracer อาศัยการสแกน (Scan) แรงดันไฟเลี้ยงที่ให้แก่อุปกรณ์ที่จะวัดคุณสมบัติ โดยใช้สัญญาณฟันเลื่อย (Saw Tooth) และเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุท (Input) ของอุปกรณ์ที่จะวัดซึ่งเป็นสัญญาณขั้นบันได (Stair Wave) สัญญาณที่ได้จะไปแสดงผลเป็นกราฟ สำหรับโครงงานนี้จะแสดงผลโดยตรงออกเครื่องออสซิลโลสโคป(Oscilloscope) ในโหมด X-Y พร้อมทั้งนำสัญญาณส่วนหนึ่งแสดงผลทางจอภาพโทรทัศน์ซึ่งจะต้องดัดแปลง (Modify)ให้เหมาะสม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

CURVE TRACER

Mr. PUNYAWAT PRINGCHAAUM

Mr. PRATCHAYA SENTHONG

Mr. PRAPAKORN SUWANNA

ADVISOR

ABSTRACT

ANY SEMICONDUCTER DEVICES HAVE THEIR CHARACTERS. CURVE TRACER IS AN INSTRUMENT USED IN DEMONSRTATION OF CHARACTERISTIC CURVE OF SEMICONDUCTER DEVICES. BY VARYING VOLTAGE TO SUPPLY CIRCUIT , AND IN THE SAME TIME VARYING THE CIRCUIT'S INPUT SIGNAL WE OBTAIN THE RELATION OF ONE OUTPUT AND ANOTHER THAT'S DISPLAYED ON OSCILLOSCOPE'S SCREEN AND ON T.V.SCREEN.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่			PAGE
1	บทนำ	.....	1
2	หลักการทำงาน	.....	3
3	หลักการคำนวนและการออกแบบ		
	ส่วนสร้างสัญญาณ	.....	4
	วงจรขยายกำลัง (POWER AMP.)	.....	8
	ส่วนวงจรไฟเลี้ยง (POWER SUPPLY)	.....	11
	การนำไปใช้งาน	.....	16
	การทำงานของภาคแสดงผล	.....	34
4	การทดลองและผลการทดลอง	.....	39
5	สรุปผลและวิจารณ์	.....	40
ภาคผนวก		.....	A-1
กิตติกรรมประกาศ		.....	41
หนังสืออ้างอิง		.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

โครงงานนี้ เป็นการสร้างเครื่องเคิร์ฟเทรเซอร์ (CURVE TRACER) เพื่อใช้ในการแสดงกราฟคุณสมบัติของอุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์ประเภทสารกึ่งตัวนำ(1Jn-2Jn) โดยจะนำมาแสดงผลกราฟบนจอรับภาพโทรทัศน แทนการใช้ OSCILLOSCOPE สำหรับเครื่องเคิร์ฟเทรเซอร์ที่สร้างขึ้นนี้ สามารถแสดงกราฟคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ (TRANSISTOR), ไดโอด (DIODE) อีกทั้งยังสามารถแสดงกราฟคุณสมบัติของเฟท (FET), เอสซีอาร์ (SCR) และอุปกรณ์ประเภท POWER ELETRONIC SEMICONDUCTER DIVICE (โดยการเพิ่มอัตราการขยายและด้านเพาว์เวอร์ขึ้น) ทำให้มีประโยชน์ในการศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ และสามารถแสดงกราฟเพื่อใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์จุดทำงาน หรือเพื่อใช้ในการออกแบบวงจร จึงเหมาะสมที่จะใช้ในห้องปฏิบัติการ

รายงานนี้ แยกเป็นส่วนๆ ซึ่งจะกล่าวเป็นบทๆดังนี้

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 หลักการทำงานของ CURVE TRACER กล่าวถึง BLOCK DIAGRAM ของการทำงานของเครื่อง และ อธิบายการทำงานของแต่ละส่วนอย่างคร่าวๆ

บทที่ 3 หลักการออกแบบและการคำนวน โดยจะแยกพิจารณาเป็นส่วนๆ ดังนี้

- โครงสร้าง และการทำงานของส่วนสร้างสัญญาณ อธิบายรายละเอียดของการทำงานส่วนนี้อย่างละเอียด
- โครงสร้าง และการทำงานของวงจรขยายกำลัง (POWER AMPLIFY) อธิบายการทำงานและหลักในการคำนวนของวงจร
- โครงสร้าง และการทำงานของส่วนวงจรจ่ายไฟเลี้ยง รวมทั้งส่วนของวงจรป้องกัน
- การนำไปใช้งาน จะกล่าวถึงวงจรตัดต่อสัญญาณ และรูปแบบต่างๆ ในการวัดอุปกรณ์ชนิดต่างๆเพื่อนำไปแสดงผลออกทาง OSCILLOSCOPE และ ทางจอภาพโทรทัศน์ ซึ่งสามารถเลือกโหมดต่างๆในการวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การทำงานของภาคแสดงผล อธิบายรายละเอียดของภาคอย่างง่าย เพื่อความเข้าใจ

บทที่ 4 ผลการทดลอง แสดงรูปสัญญาณที่จุดต่างๆของวงจรที่ได้

บทที่ 5 สรุปผลและวิจารณ์

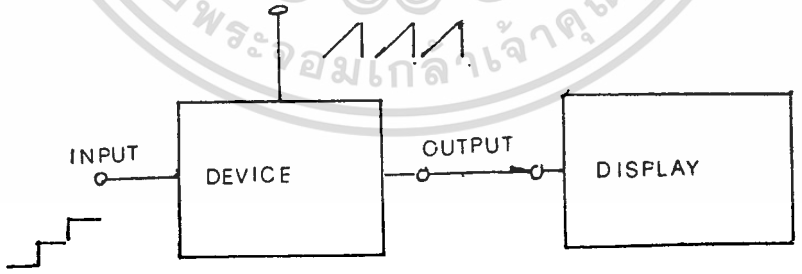
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการทำงาน

เพื่อที่จะสามารถทราบถึงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำนี้จะต้องมีการสร้างสัญญาณเพื่อใช้ในการทำให้อุปกรณ์พร้อมที่จะทำงานเสียก่อน จากนั้นจึงป้อนสัญญาณให้กับอุปกรณ์ เพื่อให้ทำงานตามลักษณะของอุปกรณ์ ซึ่งเมื่อให้อินพุท (INPUT) เป็นกระแสหรือโวลเตจค่าๆหนึ่ง พร้อมๆกับไฟเลี้ยงซึ่งเปลี่ยนค่าด้วยอัตราที่คงที่ เราสามารถทราบถึงคุณสมบัติหรือจุดการทำงานของอุปกรณ์นั้นๆ ที่ INPUT ค่านั้นๆนั่นเอง แต่ถ้าเราเปลี่ยนค่า INPUT ไปเป็นอีกค่าหนึ่ง ในลักษณะเดียวกันกับ INPUT ค่าเดิมนั้น เราจะทราบถึงคุณสมบัติของอุปกรณ์นั้นที่ INPUT ค่าใหม่นี้เช่น จะเห็นว่าถ้าเราสามารถสร้าง INPUT ให้มีหลายค่าเพียงพอในการพิจารณาถึงคุณสมบัติ เราก็จะสามารถพิจารณาคุณสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำนั้นได้

อาจพิจารณาเพื่อความเข้าใจโดยง่ายจาก BLOCK DIAGRAM ที่ 1.1



ส่วนของการแสดงผล (รูปกราฟคุณสมบัติ) จะถูกแสดงทางจอภาพโทรทัศน์ ซึ่งจะถูก modify ให้มีคุณสมบัติคล้ายการทำงานของ OSCILLOSCOPE ใน MODE X-Y ซึ่งจะเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหนึ่ง กับอีกค่าหนึ่งว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร (เมื่อเปลี่ยนค่า INPUT และไฟเลี้ยงตามที่ได้กล่าวไว้แล้ว)

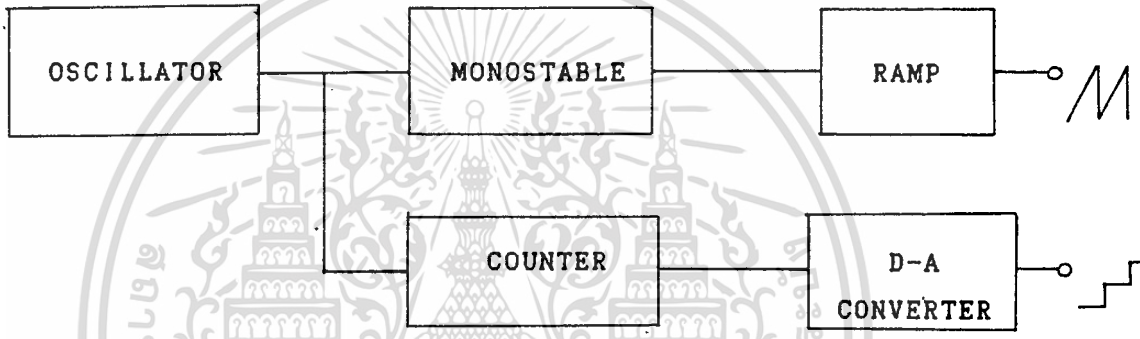
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่3

หลักการออกแบบและการคำนวน

ส่วนสร้างสัญญาณ

ในการวัดเส้นกราฟคุณสมบัติของอุปกรณ์นั้น เราต้องมี SUPPLYและ INPUT ให้กับอุปกรณ์ที่ต้องการจะวัด โดยอาศัยหลักการทำงานพื้นฐานของอุปกรณ์นั้นๆ เป็นสำคัญ

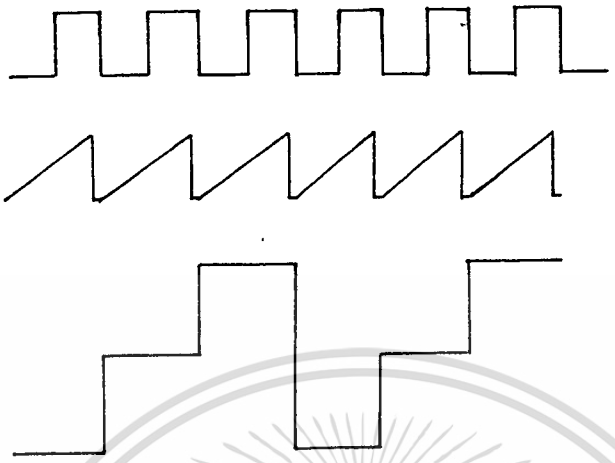


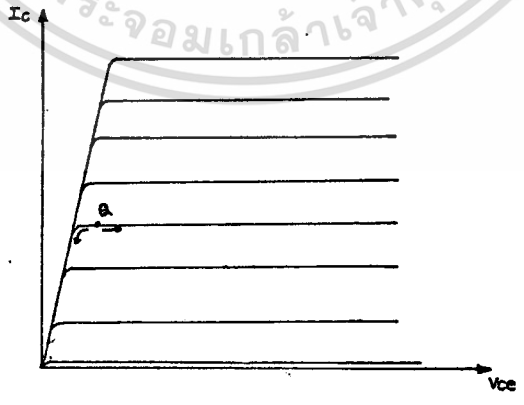
รูปที่ 2.1แสดง BLOCK DIAGRAM ของส่วนสร้างสัญญาณ

จากรูปเป็น BLOCK DIAGRAM แสดงถึงส่วนสร้างสัญญาณขั้นบันได และสัญญาณฟันเลื่อย ที่จะป้อนให้อุปกรณ์ที่ต้องการวัด โดยเริ่มจาก OSCILLATOR จะสร้างสัญญาณ SQUARE WAVE ออกมา สัญญาณ SQUARE WAVE ส่วนหนึ่งจะผ่านเข้าสู่ MONOSTABLE เพื่อบีบคาบสัญญาณให้แคบเข้า จากนั้นจึงผ่านเข้าสู่วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย ซึ่งดูได้จาก TIMING DIAGRAM

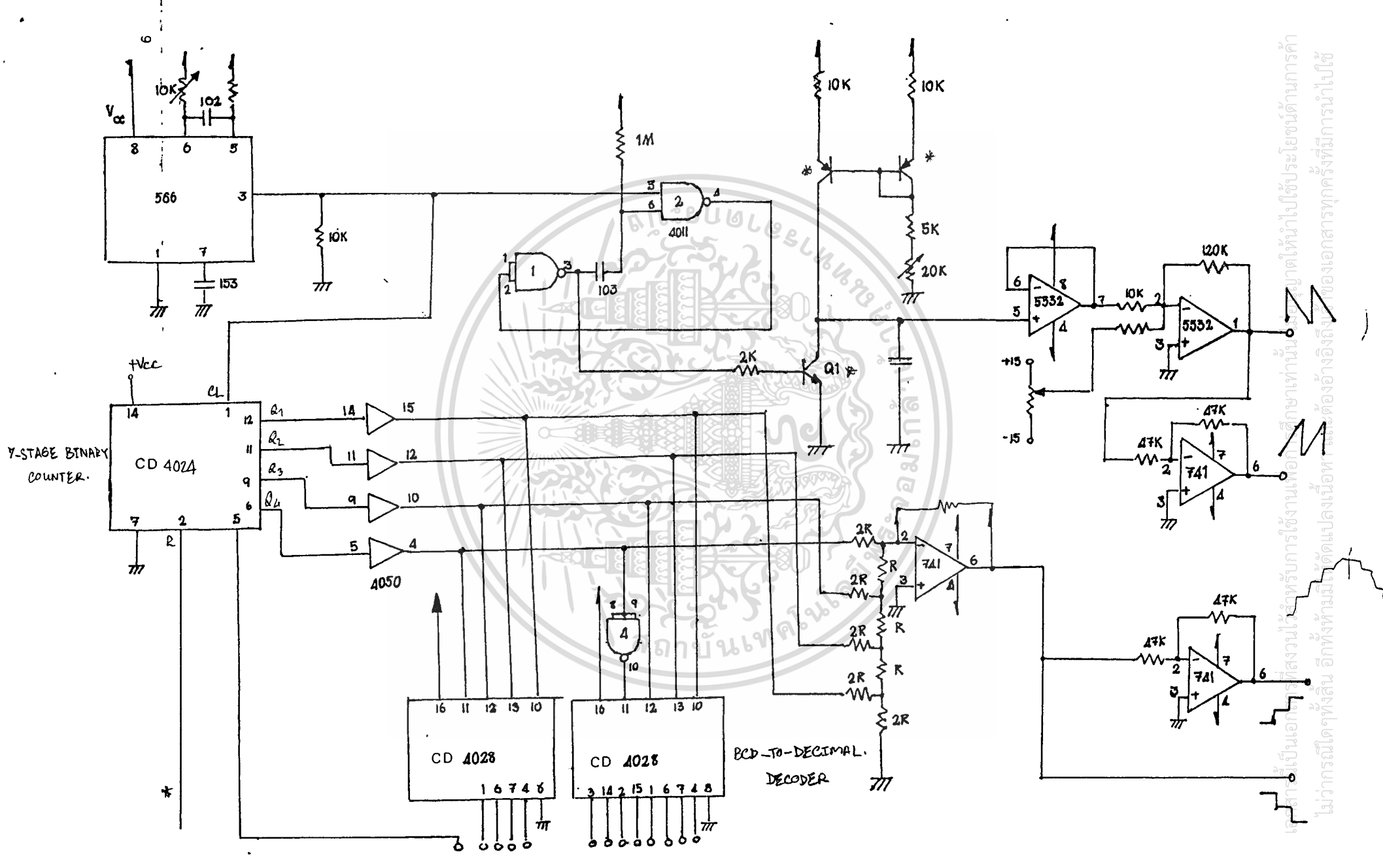
ส่วนสัญญาณ SQUARE WAVE อีกส่วนหนึ่งจะผ่านเข้าสู่ตัว COUNTER และส่วน D-A CONVERTER เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีระดับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งก็คือสัญญาณขั้นบันไดนั่นเอง ดูได้ในTIMING DIAGRAM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


10K
102
V_{cc}
566
153
10K
1M
4011
103
10K
10K
5K
20K
2K
Q1
5532
5532
120K
10K
+15
-15
47K
47K
741
+Vcc
CL
14
1
12
11
9
6
7
2
5
R
CD 4024
4-STAGE BINARY COUNTER.
Q_1
Q_2
Q_3
Q_4
14
15
11
12
9
10
5
4
4050
2R
R
741
CD 4028
CD 4028
BCD-TO-DECIMAL DECODER
47K
741

จากรูป TIMING DIAGRAM ของส่วนสร้างสัญญาณ โดยเริ่มจาก OSCILLATOR , MONOSTABLE , RAMP , COUNTER และ D-A (STAIR) ที่สำคัญก็คือสัญญาณ RAMP และ สัญญาณ STAIR จะต้องมีเฟสตรงกัน สัญญาณขั้นบันไดจะต้องมีระยะห่างแต่ละคาบเวลาเท่ากัน และความสูงของแต่ละขั้นเท่ากัน ส่วนสัญญาณฟันเลื่อยนั้น จะต้องมีความเป็น LINEARITY มีความชันเท่ากันตลอดทั้งเส้น

จากรูปแสดงถึงวงจรส่วนสร้างสัญญาณ ในที่นี้ได้ใช้ IC เบอร์ 566 เป็นตัวสร้างสัญญาณ SQUARE WAVE มีความถี่ประมาณ 500 Hz ซึ่งคำนวณได้จากสูตร

$$F_o = \frac{2 (V^+ - V_s)}{V^+ R_1 C_1}$$

- NAND GATE 1 และ 2 ต่อเป็นวงจร MONOSTABLE

- Q1 เป็นตัวสร้างสัญญาณฟันเลื่อยจาก MONOSTABLE โดยมี OP-AMP ทำหน้าที่เป็น BUFFER , INVERTING AMP. และ NON-INVERTING AMP. ทำให้ได้สัญญาณฟันเลื่อยทางด้านบวกและลบ เพื่อใช้เป็น SUPPLY ให้กับอุปกรณ์ที่จะวัด

- ในที่นี้ได้ใช้ CD 4024 (7-STAGE BINARY COUNTER) เป็น COUNTER เพื่อจะได้นำค่า OUTPUT ไปผ่าน D-A CONVERTER ได้สัญญาณขั้นบันไดออกมา

- OP-AMP 741 ต่อเป็นวงจร D-A แบบ R - 2R LADDER โดยมี OP-AMP เบอร์ 741 อีกตัว ทำหน้าที่ INVERT สัญญาณ จึงได้สัญญาณขั้นบันไดทั้งบวกและลบ เพื่อไปเป็น INPUT ให้กับอุปกรณ์ที่จะวัด

- CD 4028 (BCD-DECIMAL DECODER) ทั้งสองตัวต่อกัน เพื่อเป็นตัวกำหนดจำนวนขั้นบันได โดย OUTPUT ที่ DECODE ได้นำไป RESET COUNTER

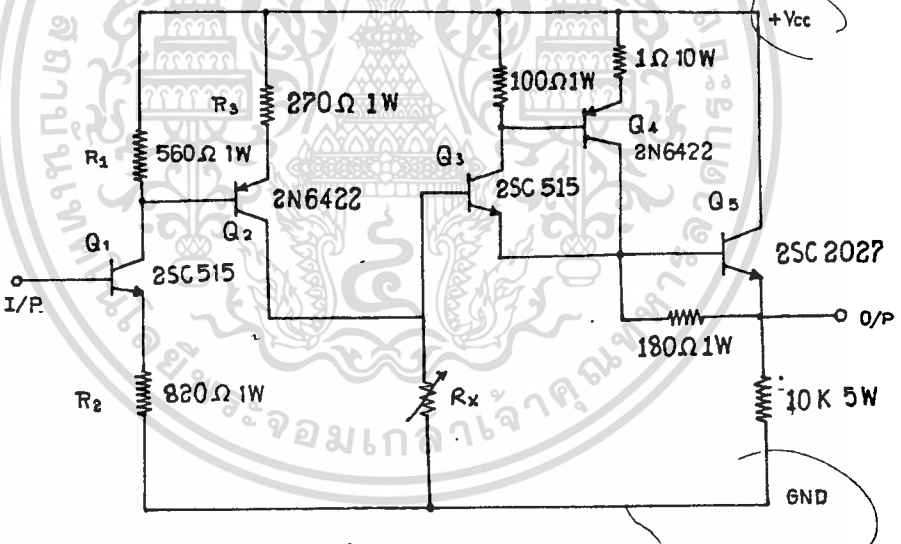
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

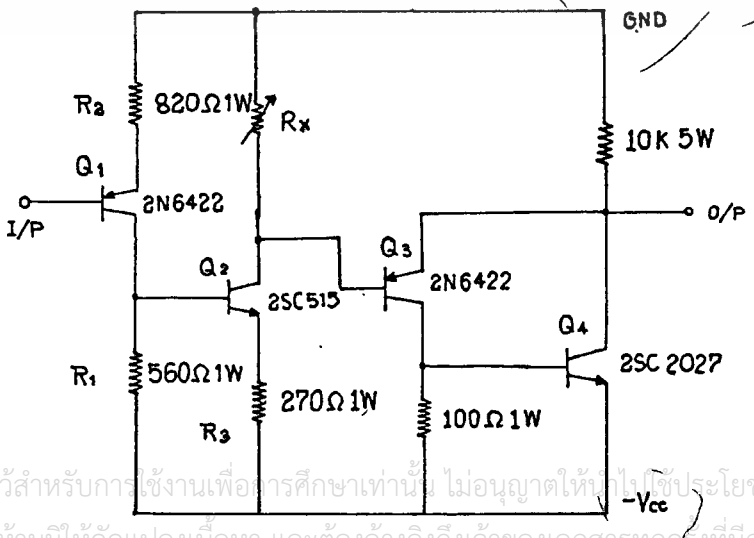
POWER AMPLIFIER

OUTPUT ที่ได้จากวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย และ สัญญาณขั้นบันไดนั้น เรายังไม่นำไปใช้ในการ BIAS แก่อุปกรณ์ที่ต้องการจะวัด CHARACTERISTIC CURVE เพราะมีขนาดสัญญาณต่ำ ไม่สามารถวัด CURVE ที่ VOLTAGE และ CURRENT สูงได้ ดังนั้นจึงต้องนำเอาวงจรทั้งสองนี้ขยายด้วยวงจร POWER AMP. เสียก่อน

วงจรขยายสัญญาณฟันเลื่อย

เนื่องจากสัญญาณฟันเลื่อยที่เราต้องการนั้น จะต้องมีระดับการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเป็นเชิงเส้น และ มีจุดต่ำสุดของสัญญาณเป็น 0 V. ดังนั้น จึงเลือกใช้วงจรขยายชนิด DIRECT COUPLING ซึ่งมีวงจรแสดงดังรูป โดยแบ่งออกเป็นวงจรขยายสัญญาณฟันเลื่อยซีกบวกและลบ



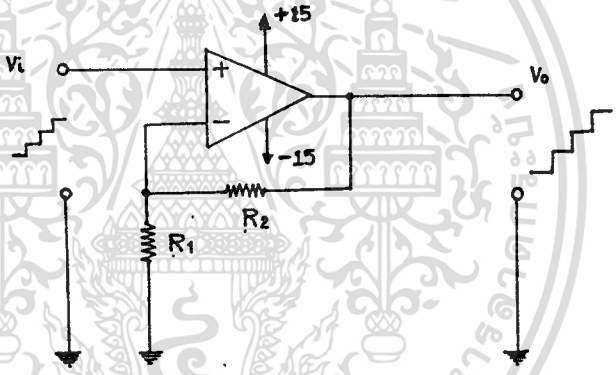


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

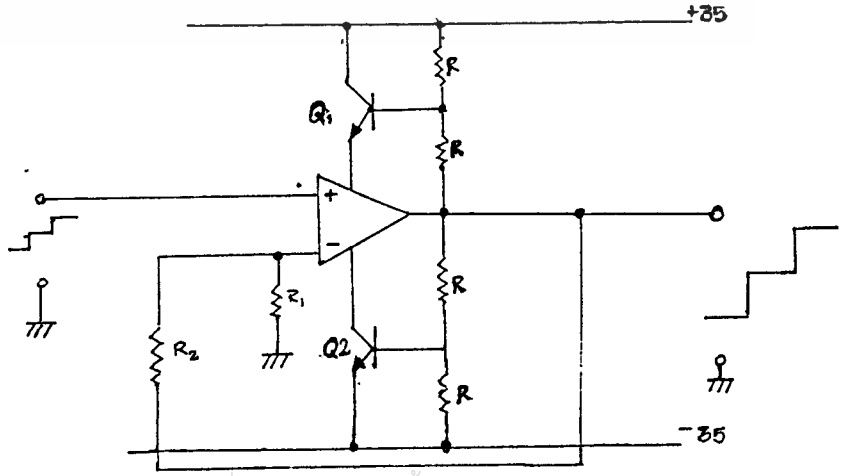
จากวงจร TRANSISTOR Q1 และ Q2 ประกอบกันเป็นวงจรขยาย โดยมีค่าอัตราขยายประมาณ (R_1 / R_2) X (R_4 / R_3)ส่วน TRANSISTOR Q3 และ Q4 ต่อกันเป็นแบบ DARLINGTON ทำให้สามารถจ่ายกระแสได้มาก วงจรนี้ใช้ระดับแรงดันสูงประมาณ 280 V. และสามารถจ่ายกระแส ได้ประมาณ 3 AMP. ที่แรงดัน 50 V.

<u>วงจรขยายสัญญาณขั้นบันได</u>

ลักษณะของวงจร OP-AMP ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณขั้นบันได แต่เนื่องจาก OP-AMP ใช้ไฟเลี้ยงได้จำกัด ทำให้ขนาดสัญญาณ OUTPUT ของ OP-AMP ซึ่งเป็นขั้นบันไดมีระดับสัญญาณสูงไม่เกิน +15,-15 V. ถ้าเราต้องการเพิ่มความสามารถในการวัด FET , MOSFET ซึ่งต้องใช้ระดับสัญญาณสูง ดังนั้นจึงต้องใช้วงจรเพิ่ม



เพื่อเป็นการช่วยให้สามารถจ่ายกระแสได้สูง จึงต้องมีวงจรเพิ่มโดยใช้ TRANSISTOR เพิ่มอีก 2 ตัว เพื่อให้ OUTPUT ของวงจรมีขนาดได้สูงประมาณ +30,-30 v. ซึ่งมีลักษณะวงจรดังรูปล่างนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
026936

วงจรในรูป มีการใช้งานเฉพาะที่ต้องการแรงดัน OUTPUT เปลี่ยนแปลงไปมาได้กว้าง โดยการเพิ่มขีดความสามารถของ OP-AMP เบอร์ 741 ให้ใช้กับแหล่งจ่ายไฟขนาด +35,-35 V. ได้ และยอมให้แรงดัน OUTPUT แกว่งได้สูงถึง 60 V_{p-p} นอกจากนั้นยังปรับอัตราขยายได้อีกด้วย

ตัวต้านทาน R_1 , R_2 , R_3 และ R_4 ทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งแรงดันเพื่อลดค่า +35,-35 ลงเหลือ +17.5,-17.5 V. Q1 และ Q2 จะลดแรงดัน +17.5,-17.5 V. ลงไปอีก 0.7 V. ดังนั้น OP-AMP ก็จะมองเห็นแหล่งจ่ายไฟของตัวมันไม่มีโอกาสเกินกว่า 33.6 V.

TRANSISTOR Q1 และ Q2 จะนำกระแสตลอดเวลา และคงแรงดัน 33.6 V.คร่อมขั้วแหล่งจ่ายไฟของ OP-AMP ตลอดทุกสภาวะ ซึ่งพิสูจน์ได้จาก

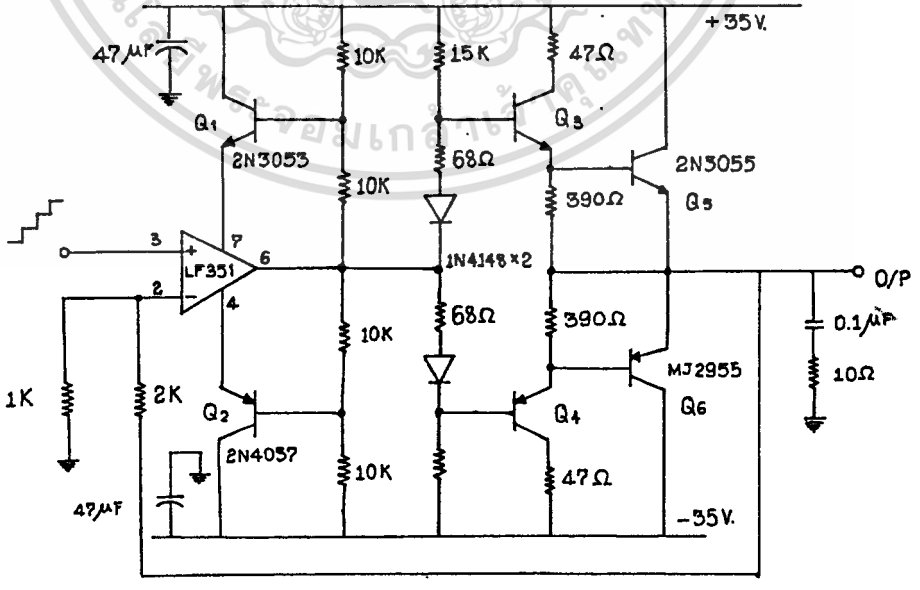
$$V^+ = 35 - ((35 - V_o) / 2) 0.7 = 16.8 + (V_o / 2)$$

$$V^- = -\{35 - ((35 - V_o) / 2) - 0.7\}$$

$$= -(16.8 - (V_o / 2))$$

$$V^+ - V^- = (16.8 + (V_o / 2)) + (16.8 - (V_o / 2)) = 33.6 \text{ V.}$$

สำหรับวงจรที่ใช้งานจริงแสดงดังรูป โดยเพิ่ม TRANSISTOR Q3,Q4, Q5 และQ6 เข้าไปเพื่อให้วงจรสามารถจ่ายกระแสได้มาก วงจรนี้จ่ายกระแสได้ประมาณ 3 AMP.และแรงดัน OUTPUT ประมาณ +30,-30 V.



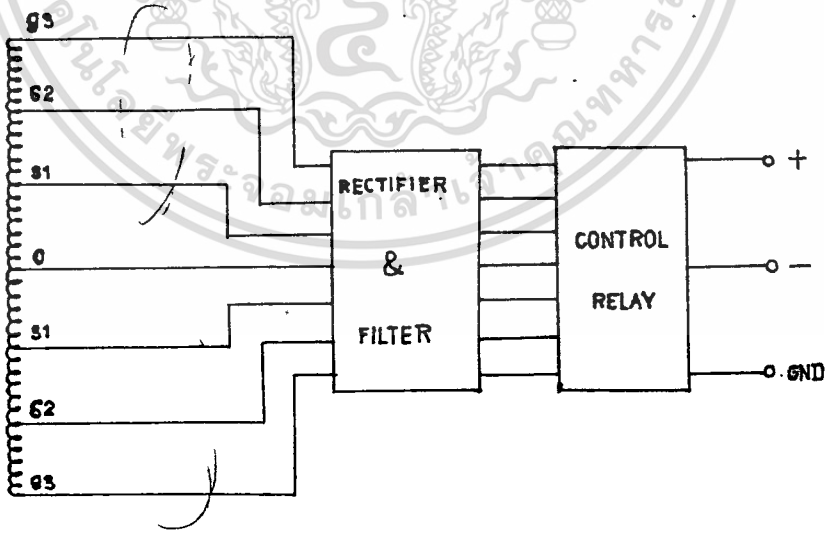
รูปแสดงวงจรขยายสัญญาณขั้นบันไดที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

POWER SUPPLY

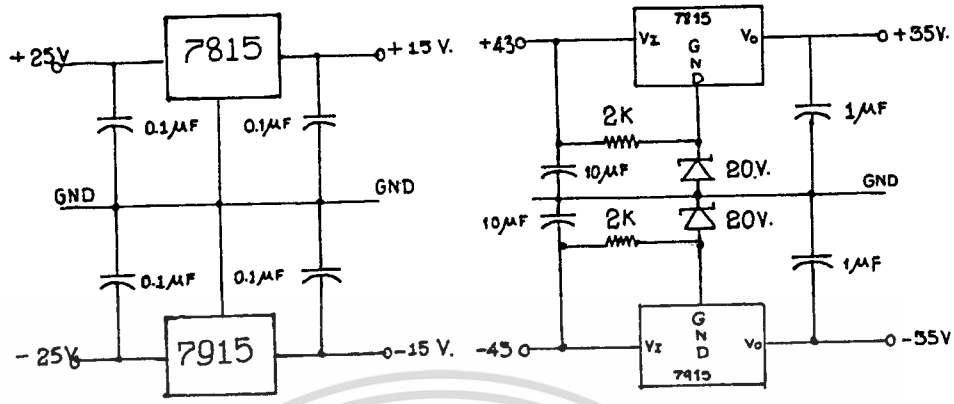
ในวงจรส่วนของ POWER SUPPLY ที่ป้อนให้แก่วงจรสร้างสัญญาณ และวงจร POWER AMP.นั้น เราแบ่ง POWER SUPPLY ออกเป็น 2 ชุด คือ POWER SUPPLY สำหรับจ่ายแก่วงจรสร้างสัญญาณ และ POWER AMP. ของสัญญาณขั้นบันได กับ POWER SUPPLY สำหรับจ่ายแก่ POWER AMP.ของสัญญาณ RAMP POWER SUPPLYที่จ่ายให้แก่วงจรส่วนสร้างสัญญาณนั้นใช้ไฟ +15,-15 VOLTS โดยดึงมาจาก POWER SUPPLY ที่จ่ายให้ POWER AMP.สัญญาณขั้นบันไดซึ่งใช้ +30,-30VOLTS โดยนำมาผ่าน REGULATOR +15,-15 VOLTS

POWER SUPPLY ที่จ่ายให้แก่ POWER AMP.ของสัญญาณ RAMP นั้นใช้ VOLTAGE หลายระดับ คือ 43, -43, 86, -86, 129, -129 VOLTS โดยจะเลือกค่า VOLTAGE ด้วยวงจร CONTROL RELAY ซึ่งจะกล่าวต่อไป

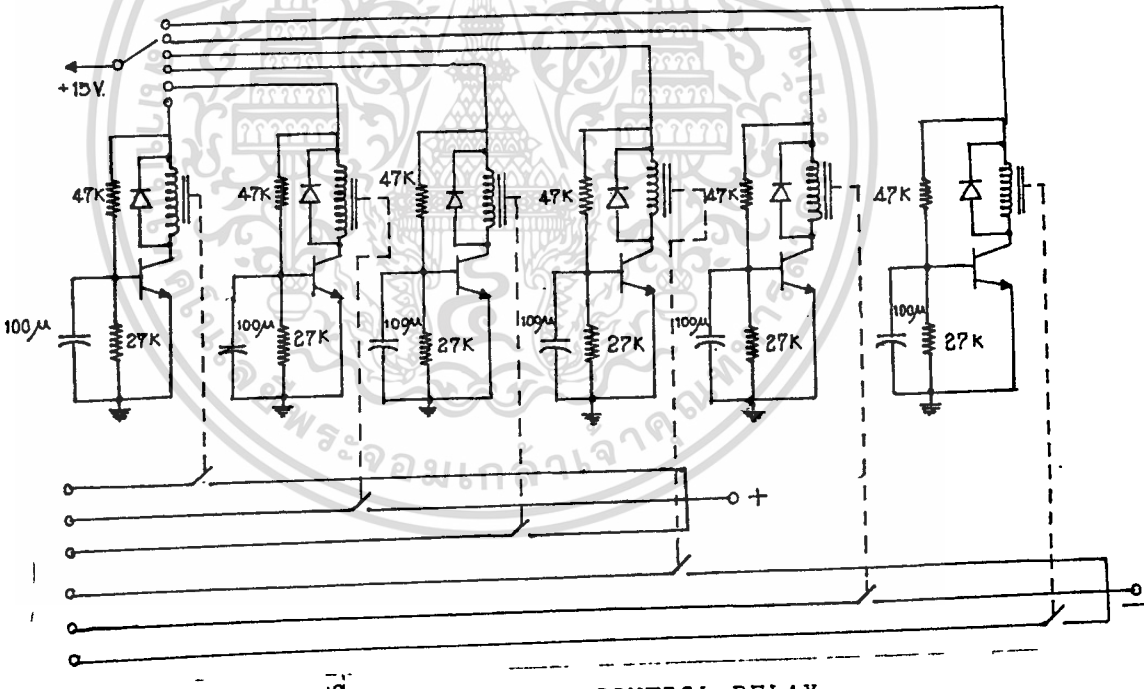


รูปที่ 4.1 แสดงส่วนของวงจร POWER SUPPLY ซึ่งจ่ายให้แก่วงจรสร้างสัญญาณและวงจร POWER AMP. สัญญาณบันได

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงวงจร POWER SUPPLY ซึ่งจ่ายให้แก่ POWER AMP. สัญญาณ RAMP



รูปที่ 4.3 แสดงวงจร CONTROL RELAY

จากรูปเป็นวงจร SUPPLY ไฟ +35,-35 V. 3 A. ที่ใช้ป้อนให้วงจร POWER AMP. สัญญาณบันไดและไฟ +15,-15 V. ที่ใช้ในวงจรส่วนสร้างสัญญาณ และวงจรส่วน LOAD LINE TR 1 , TR 2 , Z_1 , Z_2 เป็นวงจรซึ่งทำให้ไฟ +35,-35 V. มีค่าคงที่ +20,-20 V. เพื่อป้อนให้ IC REGULATOR 7815 และ 7915 เพื่อป้องกันการเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2 เป็นวงจร POWER SUPPLY ของวงจร POWER AMP. สัญญาณ RAMP ซึ่งมี VOLTAGE 6 ระดับ ด้วยกันคือ 43,-43,86,-86,129,-129 v.แต่ละค่าจะถูกเลือกใช้งาน ด้วยสัญญาณ CONTROL ผ่านทาง RELAY OUTPUT ที่ผ่านทาง RELAY จะเป็นไฟตรง

การทำงานของวงจร CONTROL RELAY

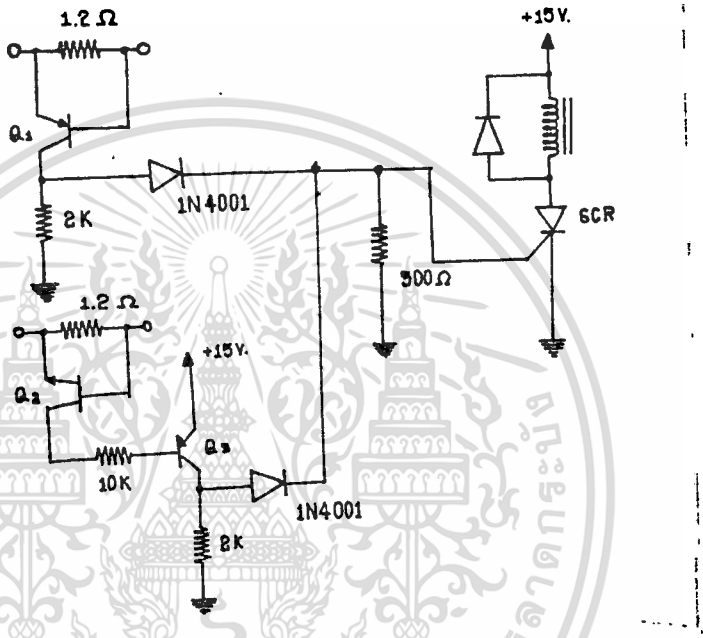
TRANSISTOR จะทำงานตามการเลือกจาก SWITCH SELECTOR โดยจะเลือกจ่าย SUPPLY 12 DC VOLT. ให้แก่วงจร วงจร TRANSISTOR จะทำหน้าที่หน่วงเวลาให้ TRANSISTOR ON ด้วยช่วงเวลา R_1 C_1 เมื่อ TRANSISTOR ON RELAY ก็จะ ON ทำการ CONTACT SWITCH

ที่ต้องใช้วงจร TRANSISTOR ทำการหน่วงเวลาการ ON-OFF ของ RELAY เพราะที่ SWITCH SELECTOR ช่วงการเปลี่ยนช่องจะมีการสัมผัสกันระหว่างหน้า CONTACT จะทำให้ RELAY มีช่วงเวลาทำงานพร้อมกัน ซึ่งทำให้เกิดการ SPARK ของหน้าสัมผัสของ CONTACT เสียหายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร PROTECTION

วงจร PROTECTION ที่ใช้เป็นวงจร LIMIT CURRENT ซึ่งใช้เป็นวงจรป้องกันการดึงกระแสของตัวอุปกรณ์ วงจรนี้ใช้ต่อระหว่าง POWER AMP. สัญญาณ RAMP กับ ตัวอุปกรณ์ที่จะวัด



แสดงวงจร LIMIT CURRENT PRSOTECTION

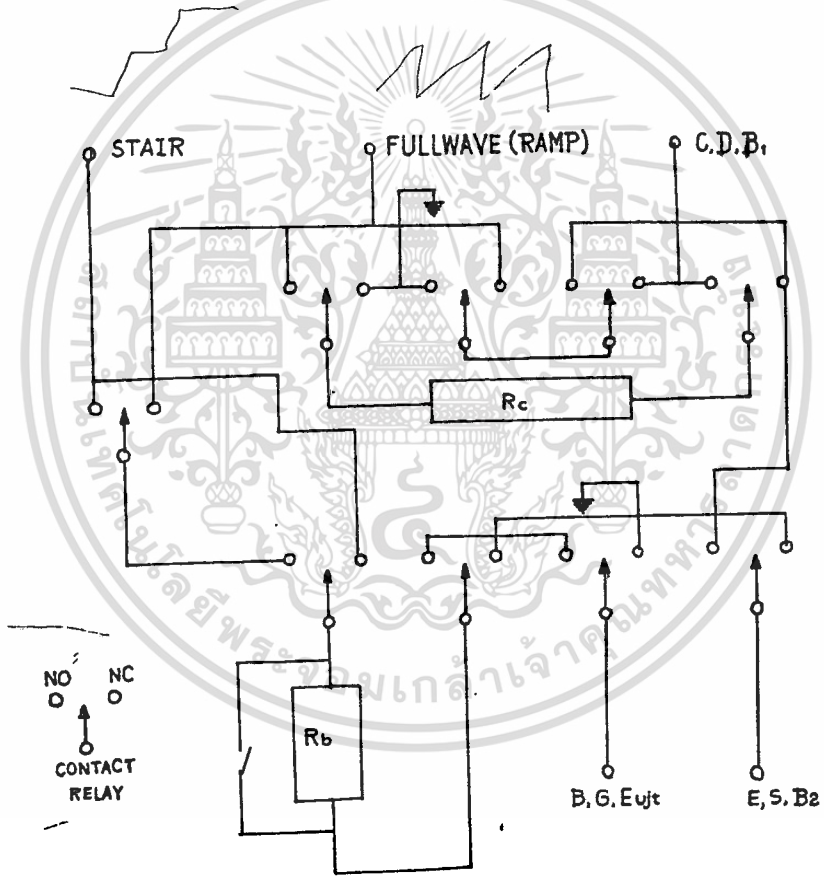
จากวงจรในช่วงที่ใช้สัญญาณ RAMP เป็นบวก ถ้ามีกระแสไหลผ่าน R 0.2 OHM มีค่าเท่ากับ 3 A ก็จะทำให้ TRANSISTOR Q_1 ทำงานเป็นผลทำให้มีกระแสไป TRIG ขา GATE ของ SCR ทำให้ RSELAY ทำงาน ตัดสัญญาณ RAMP ออกจากวงจร

ส่วนในช่วงที่ใช้สัญญาณ RAMP เป็นลบก็เช่นเดียวกัน คือ ถ้ามีกระแสไหลผ่าน R ค่า 0.2 OHM เกิน 3 A. ก็จะทำให้ TRANSISTOR Q_3 และ Q_2 ทำงาน ซึ่งก็จะทำให้มีกระแสไป TRIG ขา GATE ของ SCR ทำให้ RELAY ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนตัดต่อวงจรที่ใช้ทดสอบ

เนื่องจากสัญญาณที่จะป้อนให้กับอุปกรณ์ที่มีแรงดันและกระแสสูง ดังนั้นการใช้สวิทช์ในการเลือกจะไม่สะดวก และยังเสื่อมสภาพได้ง่าย เนื่องจากการสปาร์ คที่หน้าสัมผัส ดังนั้นการตัดต่อจึงใช้รีเรย์แทน การจัดวงจรตัดต่อของรีเรย์เพื่อการเลือกโหมดเป็นดังรูป



รูปแสดงวงจรตัดต่อโดยใช้รีเรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำไปใช้งาน

การเลือกโหมดต่างๆ

โหมด 1 : รีเลย์ทุกตัวทำงาน (ใช้ทดสอบทรานซิสเตอร์และเฟท)

โหมด 2 : รีเลย์ 1 และ 3 ทำงาน ส่วนรีเลย์ 2 ไม่ทำงาน

โหมด 3 : รีเลย์ 1 และ 2 ทำงาน ส่วนรีเลย์ 3 ไม่ทำงาน

โหมด 4 : รีเลย์ 2 และ 3 ทำงาน ส่วนรีเลย์ 1 ไม่ทำงาน

โหมด 5 : รีเลย์ทุกตัวทำงาน (ใช้ทดสอบรอยต่อพีเอ็นและBV_{ces})

คู่มือการใช้เครื่อง

1)ส่วนประกอบของเครื่อง

1.1)คุณสมบัติของเครื่อง

1.1.1)สัญญาณอินพุท

-สัญญาณขั้นบันได

เลือกจำนวนขั้น : 3-12 ขั้น

เลือกค่าโวลเตจต่อขั้น : 0.2 , 0.7 โวลท์ต่อขั้น

1.1.2)สัญญาณไฟเลี้ยง

สัญญาณ Ramp มีอัตราขยาย 6 ระดับคือ

1 , 2 , 5 , 10 , 15 , 20 เท่า

1.1.3)อุปกรณ์ต่อในการวัด

-สวิทช์เลือกวัดคุณสมบัติของอุปกรณ์

ZC (ZERO CURRENT) , ZV (ZERO VOLTAGE) , JFET (JUNCTION FET) , TrEg (TRANSISTOR EMITTER GND) , TrBg (TRANSISTOR BASE GND)

ZERO CURRENT จะวัดในกรณีพังทลาย

-BV_{cbo} เลือกโหมด 2

-BV_{ebo} เลือกโหมด 5

-BV_{ces} เลือกโหมด 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ZERO VOLTAGE จะวัดในกรณีพังทลาย

-BV_{ces} เลือกโหมด 1

-TrEs ใช้วัดทรานซิสเตอร์ ยูเจทีและเฟทเมื่อ E ลงกราวด์

-TrBs ใช้วัดทรานซิสเตอร์ กรณี E ลงกราวด์

-JFET ใช้วัดเฟท

-สวิทช์เลือกโหมด

โหมด 1:

ทรานซิสเตอร์ วัด V_{ce}/I_b , V_{be}/I_b และ V_{ce}/V_{be}

เฟท วัด V_{dd}/I_d , V_{gs}/I_g

ยูเจที วัด V_{bb}/I_b , V_{be}/I_b

โหมด 2:

ทรานซิสเตอร์ วัด V_{cb}/I_c , V_{cb}/V_{be} และ V_{be}/I_e

โหมด 3:

ทรานซิสเตอร์ วัด I_b/I_c

โหมด 4:

เฟท วัด V_{ds}/I_d

โหมด 5:

ไดโอด , ซีเนอร์ไดโอด , ไทรีสเตอร์

-สวิทช์เลือก R_c มี 12 ค่า

5,10,50,100,500 โอห์ม

1,5,10,50,100,500 กิโลโอห์ม

-สวิทช์เลือก R_b มี 12 ค่า

5,10,50,100,500 โอห์ม

1,5,10,50,100,500 กิโลโอห์ม

:ความต้านทานภายนอกของ R_c,R_b อาจจะต่อเพิ่มตามความเหมาะสม

ข้อควรระวัง

เพื่อป้องกันการชำรุดเสียหายของสวิทช์ที่ใช้เลือกค่า R_b และ R_c สำหรับใช้วัดโหมดต่างๆกัน เมื่อต้องการเปลี่ยนค่าของ R_b และ R_c แต่ละครั้งควรปิดสวิทช์ก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

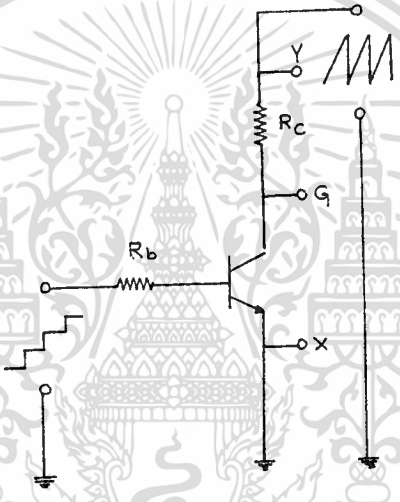
การวัดค่าต่างๆของอุปกรณ์

TRANSISTOR-จะแสดงเฉพาะชนิด NPN

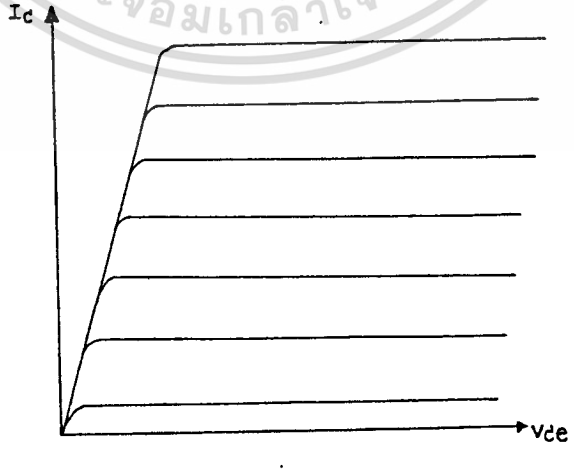
MODE 1:

1.1 การวัด V_{ce}/I_c

V_{ce}/I_c curve นี้เป็น OUTPUT CHARACTERISTIC ของ NPN TRANSISTOR โดยที่ EMITTER GROUND มี TEST CIRCUIT ดังรูป 6.1.1a และมี characteristic curve ดังรูป 6.1.1b



รูปที่ 6.1.1a V_{ce}/I_c TEST CIRCUIT



รูปที่ 6.1.1b แสดง V_{ce}/I_c CHARACTERISTIC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดสอบหลังจากผ่านขั้นเตรียมแล้วมีดังนี้

1) เริ่มแรก

-ใส่ TRANSITOR ลงไปในซ็อกเก็ตให้ถูกตำแหน่งขา

-เลือก [NPN:PNP]

-เลือก [ZC,ZV,JFET,TREg,TRBg]

-เลือก [MODE]

2) เพิ่ม GAIN ของสัญญาน RAMP ขึ้นช้าๆจะได้เคิร์พดังรูป 6.1.1b

3) สามารถปรับค่า R_b ได้ สังเกตรูปเคิร์ฟ เวลาลดค่า R_b ซึ่งในที่นี้เป็นการเพิ่มค่า I_b/STEP

4) ปรับค่า R_c ให้เหมาะสม ถ้าน้อยเกินไปอาจเกิดอันตรายได้ เมื่อกระแสสูงไหลผ่าน

1.2 การวัดค่า V_{ce}/I_b

CHARCTERIRSTIC CURVE V_{ce}/I_b โดยที่EMITTER-GROUND เป็นดังรูปที่ 6.1.2a และ TEST CIRCUIT ในรูป 6.1.2b

วิธีทดสอบหลังจากผ่านขั้นเตรียมแล้วมีดังนี้

1) เริ่มแรก

-ใส่ TRANSISTOR ลงไปในซ็อกเก็ตให้ถูกตำแหน่งขา

-เลือก [NPN:PNP] เลือก NPN

-เลือก [ZC,ZV,JFET,TREg,TRBg] เลือก TREg

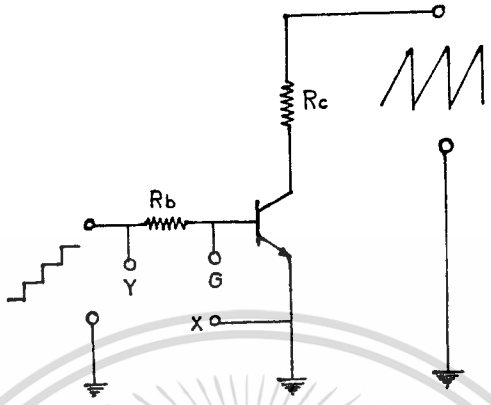
-เลือก [MODE] เลือก 1

2) ขั้นตอนต่อไปเหมือนการทดสอบ V_{ce}/I_c ของ TRANSISTOR

-ข้อควรระวัง กระแส I_c อาจจไหลมากเกินไป เนื่องจากไม่สามารถเห็นค่ากระแสทางจอภาพ

-เหมือนการวัด V_{ce}/I_c เพียงแต่เปลี่ยนจุดในการวัด ตามรูป 6.2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 6.1.2a V_{be}/I_b TEST CIRCUIT

รูป 6.1.2b V_{be}/I_b CHARACTERISTIC CURVE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 การวัด V_{ce}/V_{be}

CURVE V_{ce}/V_{be} โดยที่ EMITTER ลง GROUND แสดงได้ดังรูปที่ 6.1.3a และ TEST CIRCUIT ดังรูป 6.1.3b วิธีทดสอบหลังจากผ่านขั้นเตรียมแล้วมีดังนี้

1) เริ่มแรก

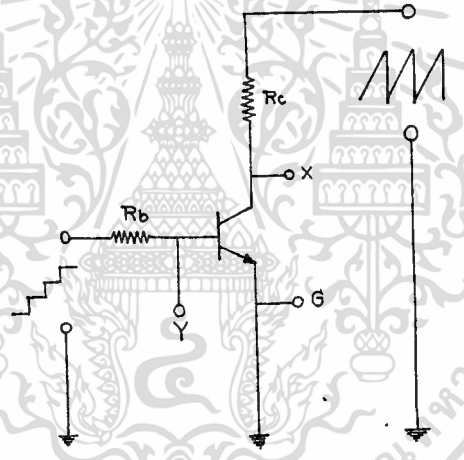
-ใส่ TRANSISTOR ลงให้ถูกตำแหน่ง

-เลือก [NPN/PNP] เลือก NPN

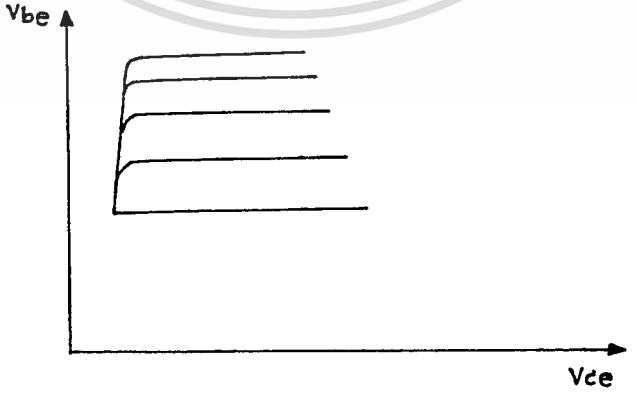
-เลือก [ZC,ZV,JFET,TREg,TRBg] เลือก TREg

-เลือก [MODE] เลือก 1

2) ขั้นตอนต่อไปเหมือนการทดสอบ V_{ce}/I_c ของ TRANSISTOR เพียงแต่เปลี่ยนจุดในการวัด ตามรูป 6.1.3



รูปที่ 6.1.3a V_{ce}/V_{be} TEST CIRCUIT



รูปที่ 6.1.3b V_{ce}/V_{be} CHACTERISTIC CURVE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MODE 2:

2.1 การวัด V_{CE}/I_C

V/I CURVEนี้เป็น OUTPUT CHARACTERISTICของ NPN TRANSISTER ที่มี BASE GROUND โดยมี TEST CIRCUIT ในรูป 6.2.1a และมีเคิร์ฟ 6.2.1b วิธีทดสอบหลังผ่านขั้นเตรียมแล้วมีดังนี้

1) เริ่มแรก

-ใส่ TRANSISTOR ตามตำแหน่ง

-เลือก [NPN,PNP] เลือก NPN

-เลือก [ZC,ZV,JFET,TREg,TRBg] เลือก 2

2) ปรับ GAIN ของRAMP เพิ่มขึ้นช้าๆ จะได้ดังรูป 6.2.1b

3) สามารถปรับค่า R_B ได้ ซึ่งเมื่อลดค่า R_B ในที่นี้เป็นการเพิ่มค่า I_B/STEP

4) ปรับค่า R_C ให้เหมาะสม

2.2 การวัดค่า V_{BE}/I_B

V_{BE}/I_B เคิร์ฟนี้เป็นคุณสมบัติของ NPN TRANSISTOR โดยที่ขา BASE เป็น GROUND แสดงตามรูป 6.2.2b และ TEST CIRCUIT 6.2.2a วิธีการทดสอบ หลังจากผ่านขั้นเตรียมแล้ว มีดังนี้

1) เริ่มแรก

-ใส่ TRANSISTOR ลงในตำแหน่งที่ถูกต้อง

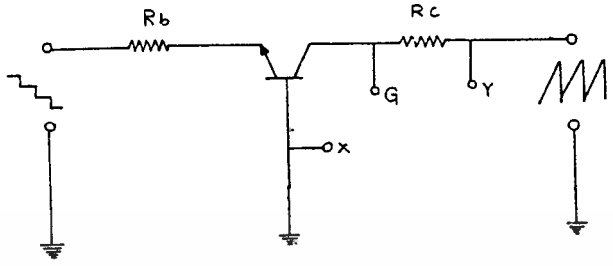
-เลือก [NPN,PNP] เลือก NPN

-เลือก [ZC,ZV,JFET,TREg,TRBg] เลือก TRBg

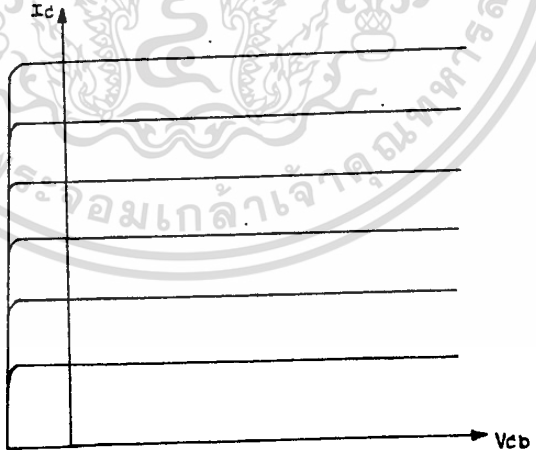
-เลือก [MODE] เลือก 2

2) ขั้นตอนต่อไปจะเหมือนการทดสอบ V_{CE}/I_C ของ TRANSISTOR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

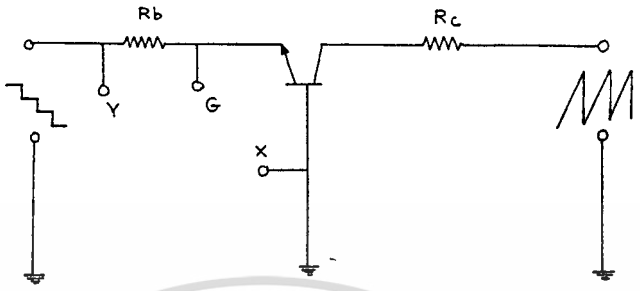


รูปที่ 6.2.1a V_{cb}/I_e TEST CIRCUIT

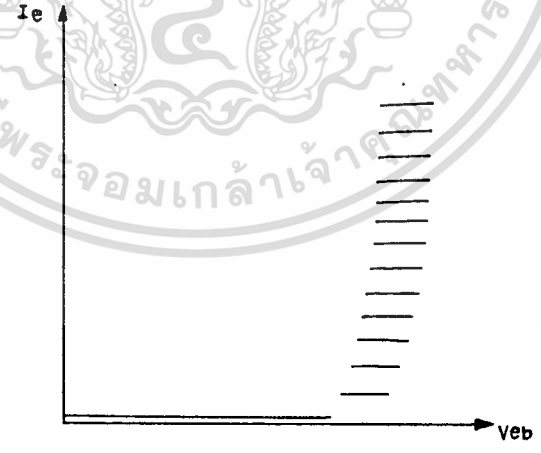


รูปที่ 6.2.1b V_{cb}/I_c CURVE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2.2a V_{bb}/I_e TEST CIRCUIT



รูปที่ 6.2.2b V_{bb}/I_e CURVE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การวัด V_{cb}/V_{eb}

V_{cb}/V_{eb} เครื่องนี้เป็นของ NPN TRANSISTOR โดยที่ขา BASE เป็น GROUND แสดงตามรูปที่ 6.2.3a และมี TEST CIRCUIT ตาม 6.2.3b วิธีการทดสอบหลังจากผ่านขั้นเตรียมแล้ว มีดังนี้

1) เริ่มแรก

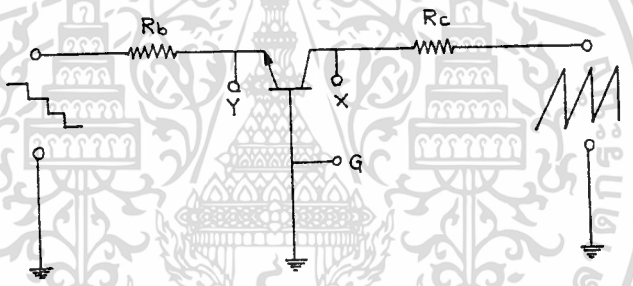
-ใส่ TRANSISTOR ให้ถูกตำแหน่ง

-เลือก [NPN,PNP] เลือก NPN

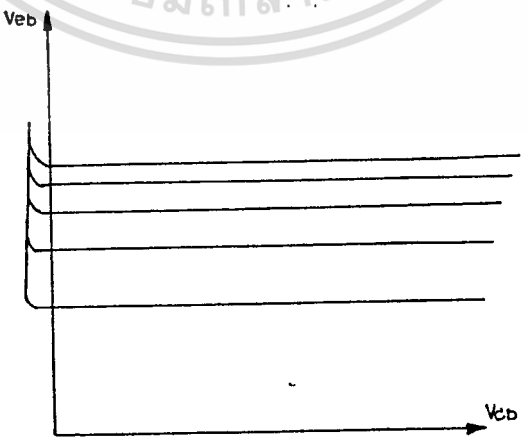
-เลือก [ZC,ZV,JFET,TREg,TRBg] เลือก TRBg

-เลือก [MODE] เลือก 2

2 ขั้นตอนต่อไปจะเหมือนการทดสอบ V_{cb}/I_c ของ TRANSISTOR



รูปที่ 6.2.3a V_{cb}/V_{eb} TEST CIRCUIT



รูปที่ 6.2.3b V_{cb}/V_{eb} CURVE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MODE 3:

3.1 การวัด I_b/I_c CURVE

I_b/I_c CURVE นี้เป็น OUTPUT CHARACTERISTIC ของ NPN TRANSISTOR ที่มี EMITTER ลง GROUND โดยมี TEST CIRCUIT ดังรูปที่ 6.2.3a และมีเคิร์ฟดังรูป 6.2.3b

วิธีการทดสอบหลังจากผ่านขั้นเตรียม

1) เริ่มแรก

-ใส่ TRANSISTOR ให้ถูกตำแหน่ง

-เลือก [NPN,PNP] เลือก NPN

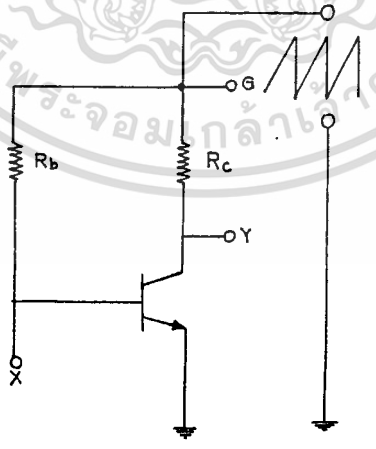
-เลือก [ZC,ZV,JFET,TREg,TRBg] เลือก TRBg

-เลือก [MODE] เลือก 3

2) ปรับ GAIN ของ RAMP เพิ่มขึ้นช้าๆจะได้ดังรูปที่ 6.2.3b

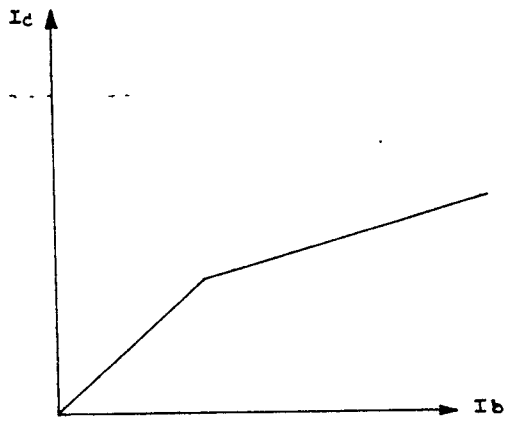
3) สามารถปรับค่า R_b ไปยัง RANG อื่นได้ ควรระวังค่าโวลเตจสูงเกินไป เนื่องจาก R_b ต่อไปยังสัญญาณ RAMP

4) ปรับค่า R_c ให้เหมาะสม ถ้าน้อยเกินไปอาจเกิดอันตรายได้ เมื่อกระแสสูงไหลผ่าน



รูปที่ 6.2.3a I_b/I_c TEST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2.3b I_b/I_c CURVE

MODE 5:

การวัด FORWORD และ REWORD CHARACTERISTIC ของ DIODE, ZENER, THYRISTER

-ใส่ DIODE ในตำแหน่งที่ถูกต้อง

-เลือก [NPN,PNP] เลือก NPN

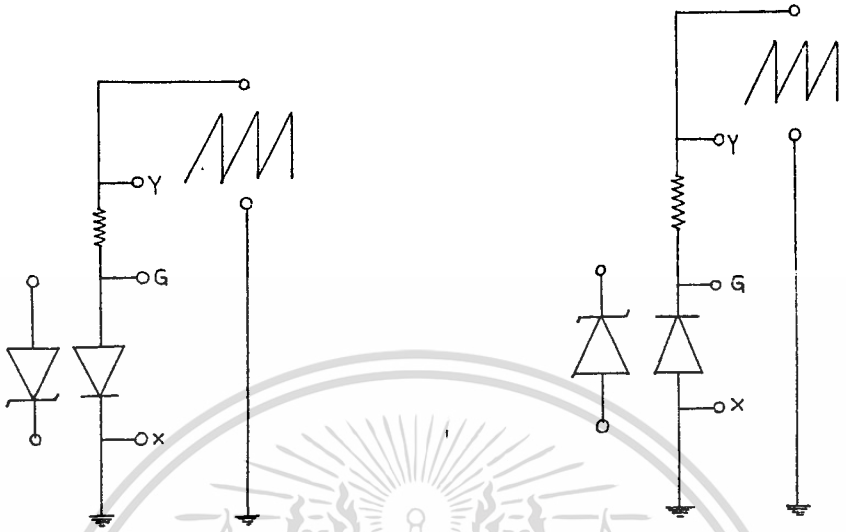
-เลือก [ZC,ZV,JFET,TREg,TRBg] เลือก ZC

-เลือก [MODE] เลือก 5

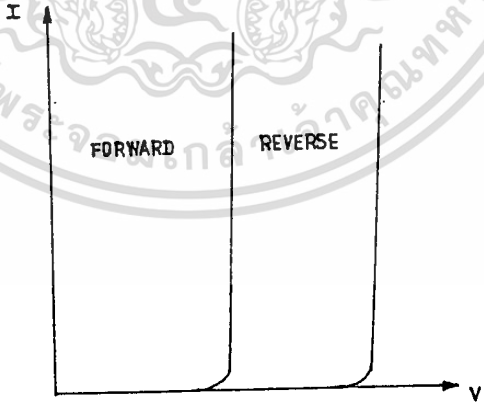
-ปรับค่า R_c ไว้ที่ 1 M ในกรณี REVERSE ส่วนกรณี FORWORD แล้วแต่ละชนิดของ DIODE

-ปรับ GAIN ของ RAMP ให้เพิ่มขึ้นช้าๆ สังเกตเคิร์ฟบนจอภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

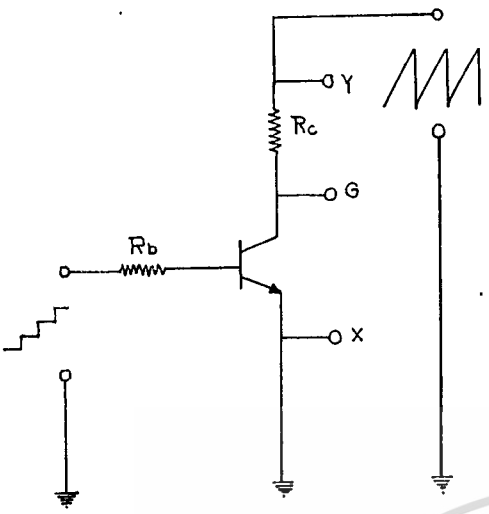


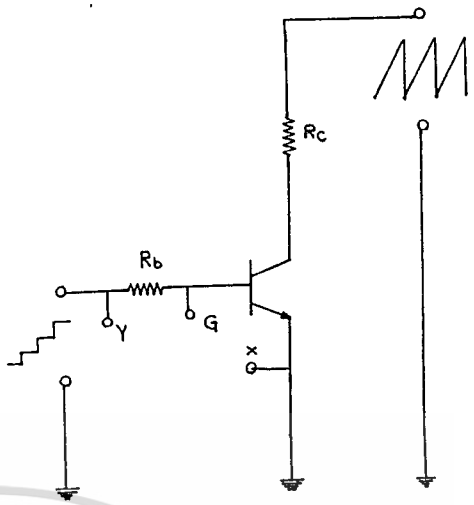
รูปที่ 6.5a DIODE TEST CIRCUIT

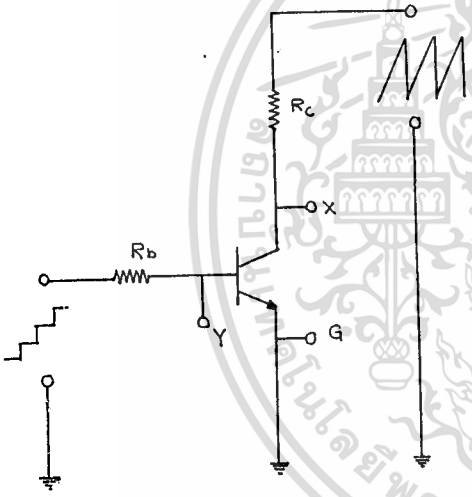


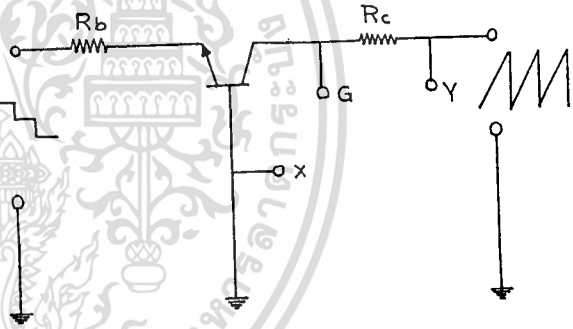
รูปที่ 6.5b DIODE CHARCTERISTIC CURVE

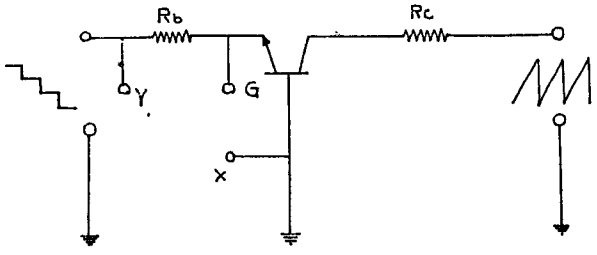
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

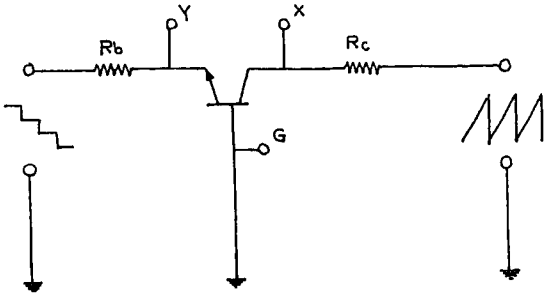




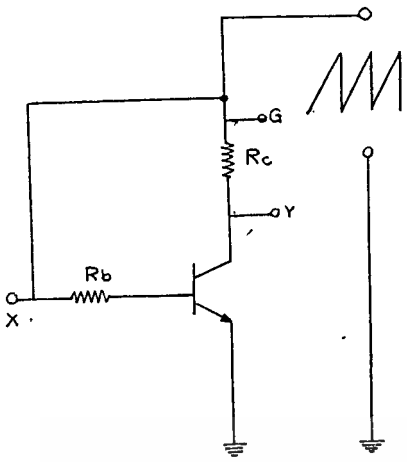


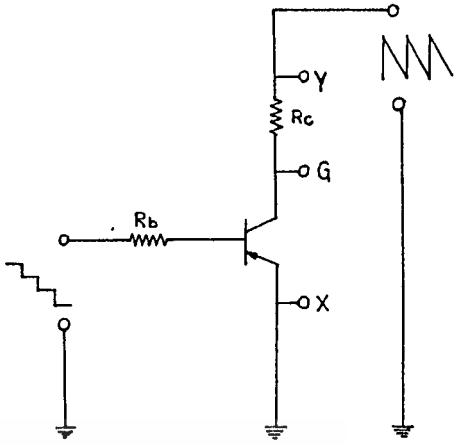


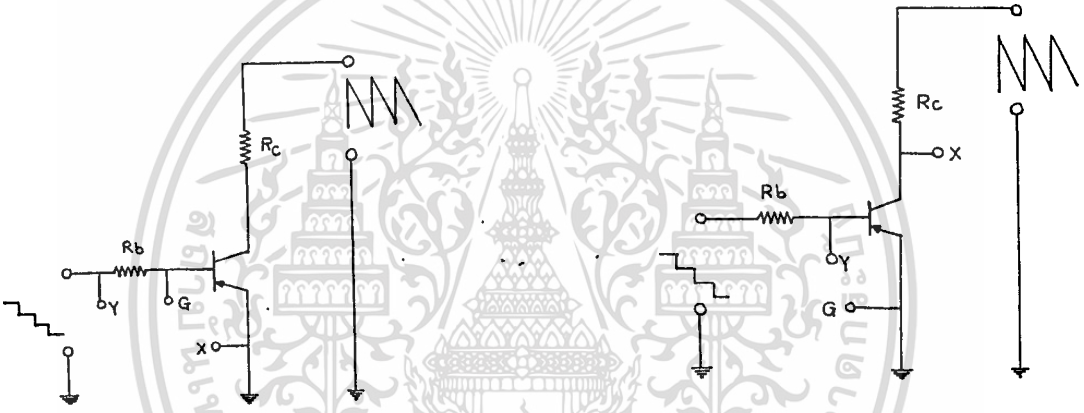


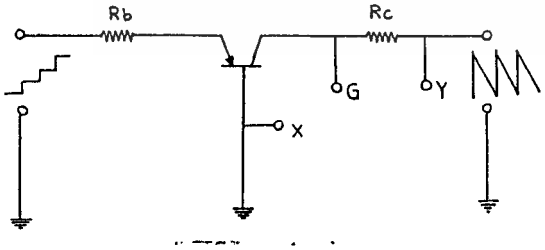


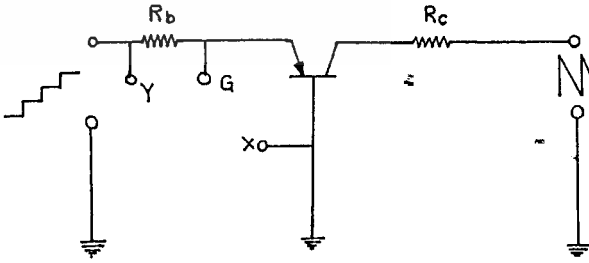
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



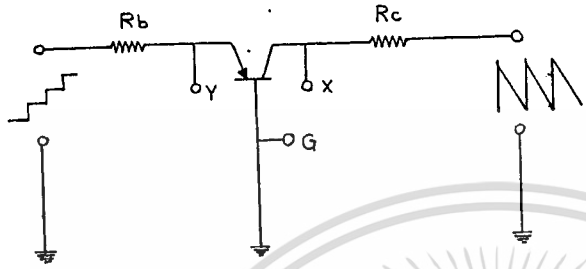


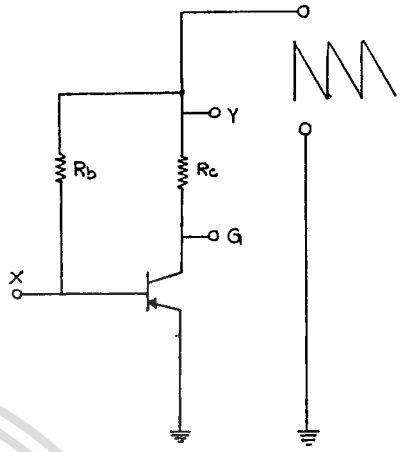


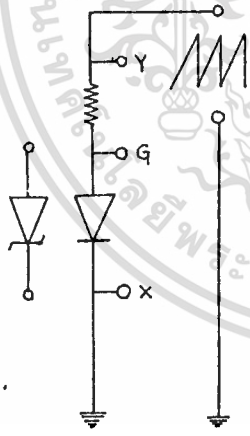


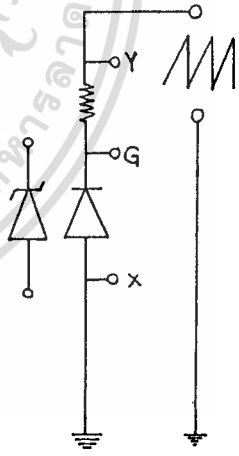


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

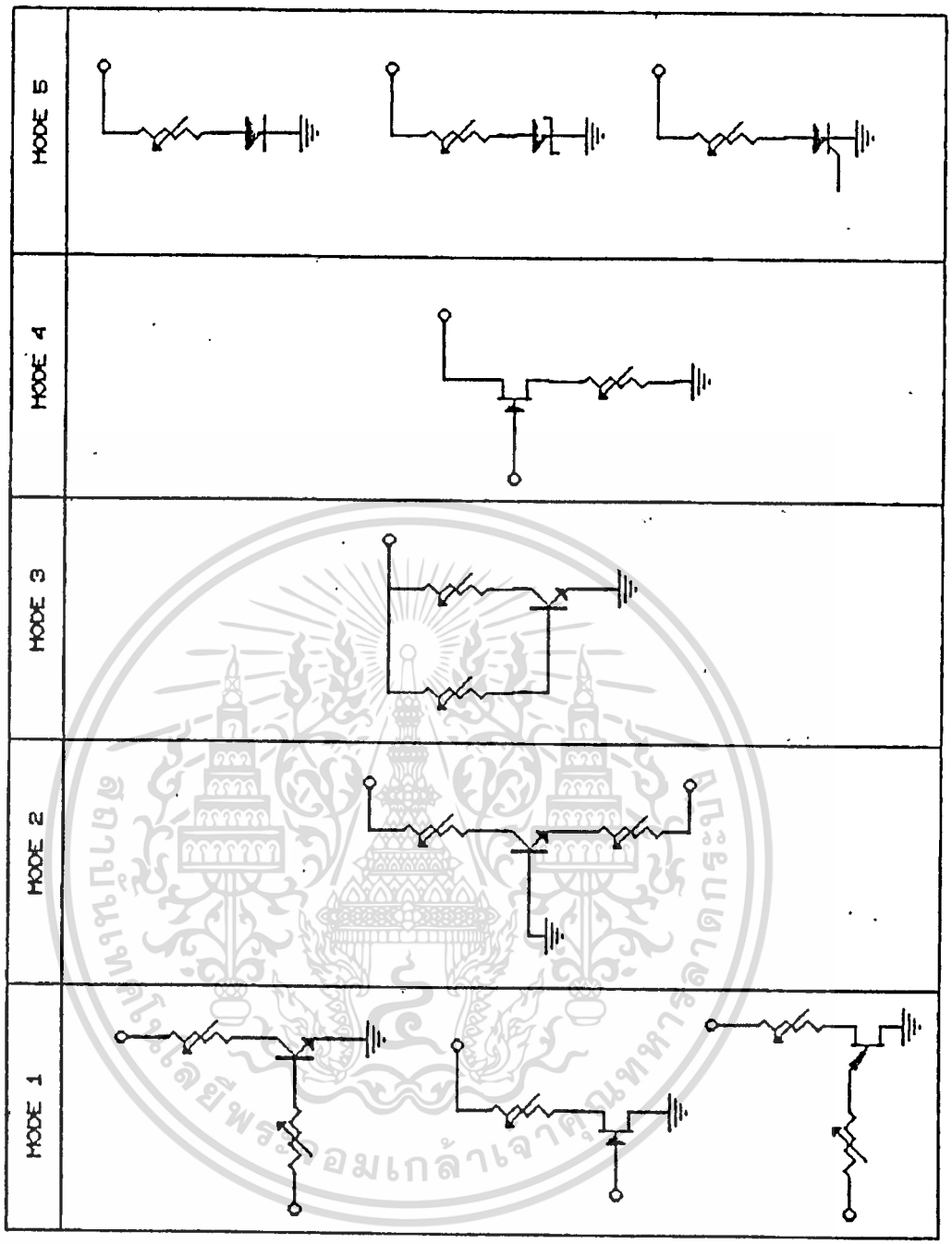








เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 2 แสดงสรุปโหมดการวัดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.3 สรุปการใช้เครื่องวัดอุปกรณ์

ชนิดอุปกรณ์	ไฟเลี้ยง	สัญญาณเข้า	โหมด	คุณสมบัติที่วัด
NPN TR	S+	ST+	1	Vce¦Ic
	S+	ST+	1	Vbe¦Ib
	S+	ST+	1	Vce¦Vbe
	S+	ST-	2	Vcb¦Ic
	S+	ST-	2	Vbe¦Ie
	S+	ST-	2	Vcb¦Veb
	S+	ST+	3	Ib¦Ic
PNP TR	S-	ST-	1	Vce¦Ic
	S-	ST-	1	Vbe¦Ib
	S-	ST-	1	Vce¦Vbe
	S-	ST+	2	Vcb¦Ic
	S-	ST+	2	Vbe¦Ie
	S-	ST+	2	Vcb¦Veb
	S-	ST-	3	Ib¦Ic
JFET N-CH	S+	ST-	1	Vds¦Id
	S+	ST-	4	Vgs¦Is
JFET P-CH	S-	ST+	1	Vds¦Id
	S-	ST+	4	Vgs¦Is
UJT	S+	ST+	1	Vbb¦Ib
	S+	ST+	1	Ve¦Ie
DIODE	R+,R-	-	5	Vd¦Id
ZENER	R+,R-	-	5	Vd¦Id
SCR	R+,R-	-	5	Vak¦Iak

ตารางที่ 1 แสดงลักษณะการใช้เครื่องวัดอุปกรณ์ชนิดต่างๆ

โดย S+ แทน สัญญาณเต็มคลื่นซีกบวก ST+ แทน สัญญาณขั้นบันไดบวก

S- แทน สัญญาณเต็มคลื่นซีกลบ ST- แทน สัญญาณขั้นบันไดลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของภาคแสดงผล

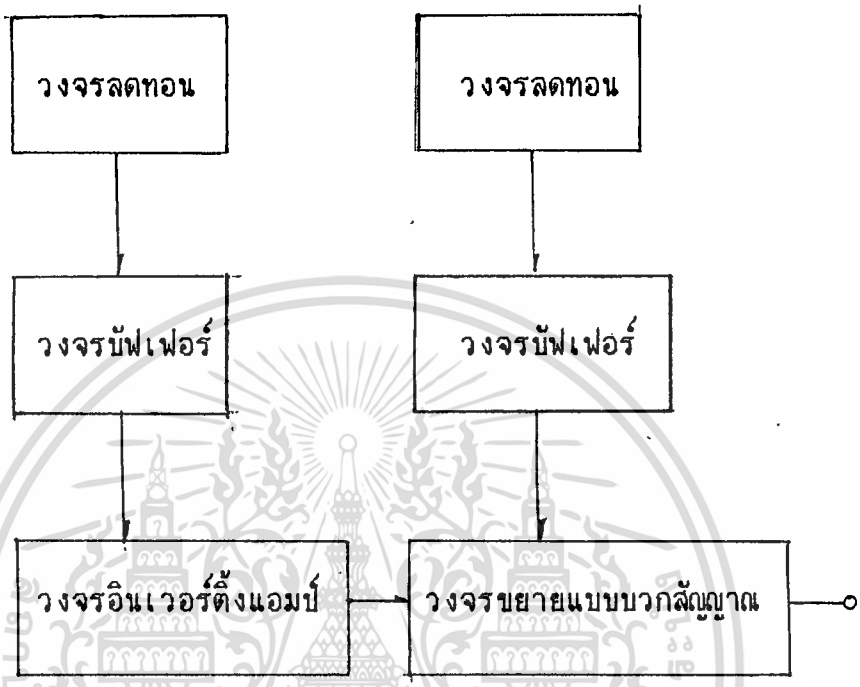
ส่วนของการแสดงผลนั้น เราสามารถแบ่งวงจรออกเป็นส่วนย่อยๆได้ 2 ส่วน คือ 1 ส่วนบัฟเฟอร์ ส่วนลดทอนสัญญาณ ส่วนวงจรขยายแบบรวมสัญญาณ และวงจรขยาย 2 ส่วนแปลงสัญญาณ จากโวลเตจเป็นกระแสเพื่อนำไปเข้า ขดลวดหักเหของจอภาพ

6.1 ส่วนบัฟเฟอร์ ส่วนลดทอนสัญญาณ

ปรกติในเครื่องมือวัดนั้น อินพุทอิมพีแดนซ์จะมีค่าสูงๆ ดังนั้นก่อนนำเข้าข้อมูลแสดงผลควรจะต่อผ่านวงจรบัฟเฟอร์ ในที่นี้เราใช้เฟทออปแอมป์ต่อแบบ นอน-อินเวอร์ติ้งแอมป์ที่มีอัตราการขยายเท่ากับ 1 ซึ่งจะทำให้มีอินพุทอิมพีแดนซ์สูงมาก และเนื่องจากว่าออปแอมป์สามารถรับอินพุทได้สูงสุดได้ถึงได้ไม่เกินไฟเลี้ยง +15,-15V. ในขณะที่อินพุททที่วัดจริงสมารถมีค่าได้สูงถึงบวกลบ 129V. จึงต้องมีวงจรลดทอนสัญญาณโดยใช้ความต้านทานแบ่งแรงดัน และเนื่องจากอินพุทอิมพีแดนซ์มีค่าสูงมาก เราจึงใช้ความต้านทานค่าสูงๆในการลดทอนได้ และใช้ซีเนอร์ไดโอด 15 V. เพื่อป้องกันไม่ให้สัญญาณอินพุทของออปแอมป์มีค่าเกินบวกลบ 15 V.

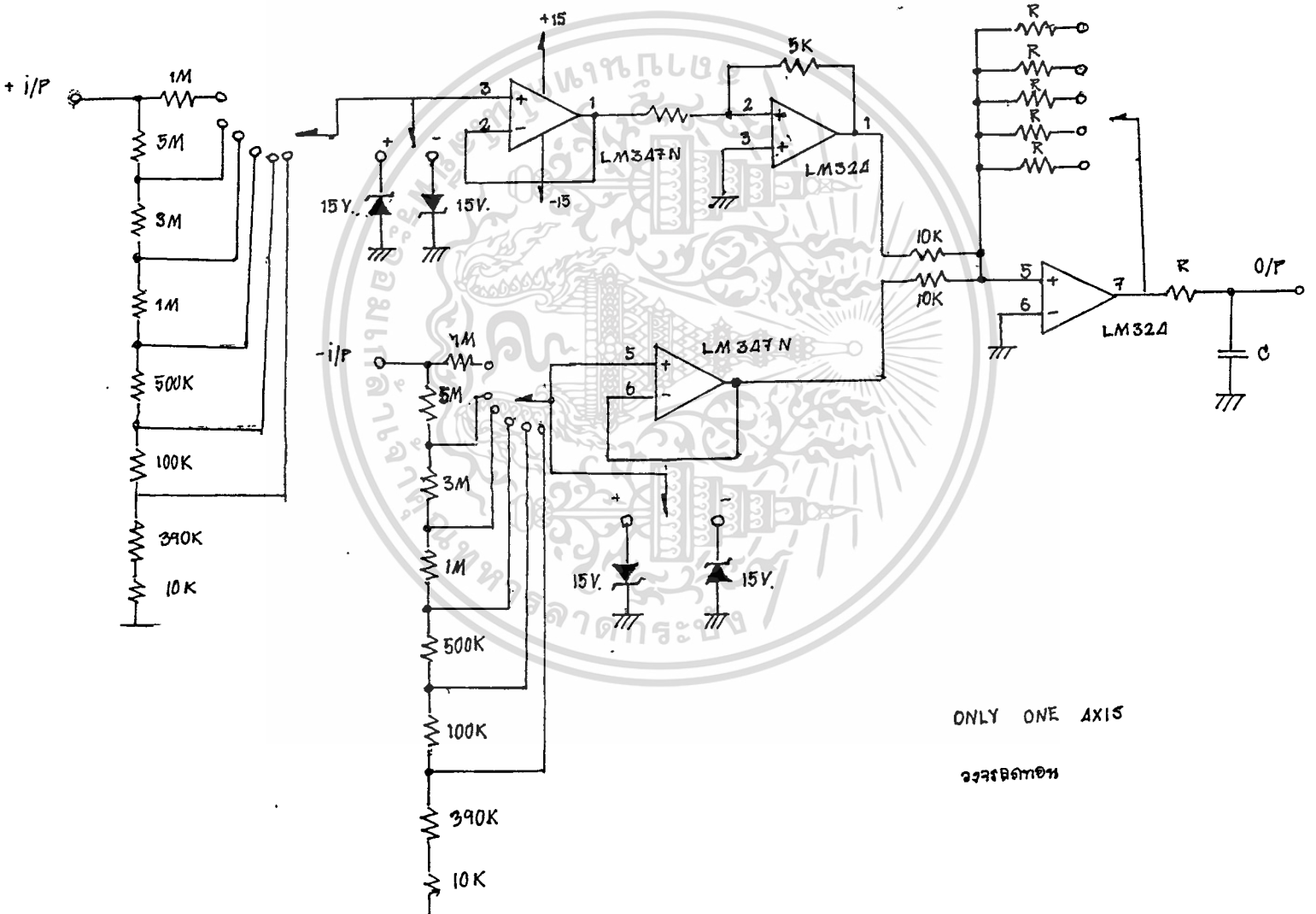
สัญญาณลดทอนจากเอาท์พุทออปแอมป์ จะนำไปเข้าวงจรขยายแบบรวมสัญญาณ โดยมีสัญญาณหนึ่งถูกกลับเฟสให้เป็นลบ เมื่อนำมาบวกกันจะได้สัญญาณซึ่งหักล้างกัน ส่วนอัตราขยายของวงจรขยายสามารถปรับให้มากหรือน้อยได้ ที่ภาคเอท์พุทของวงจรขยายแบบรวมสัญญาณ จะมีไดโอดและซีเนอร์ไดโอดเพื่อให้เอาท์พุทมีค่าอยู่ระหว่างค่าที่ต้องการเพื่อป้องกันวงจรของภาคถัดไป สามารถเขียนผังการทำงานได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

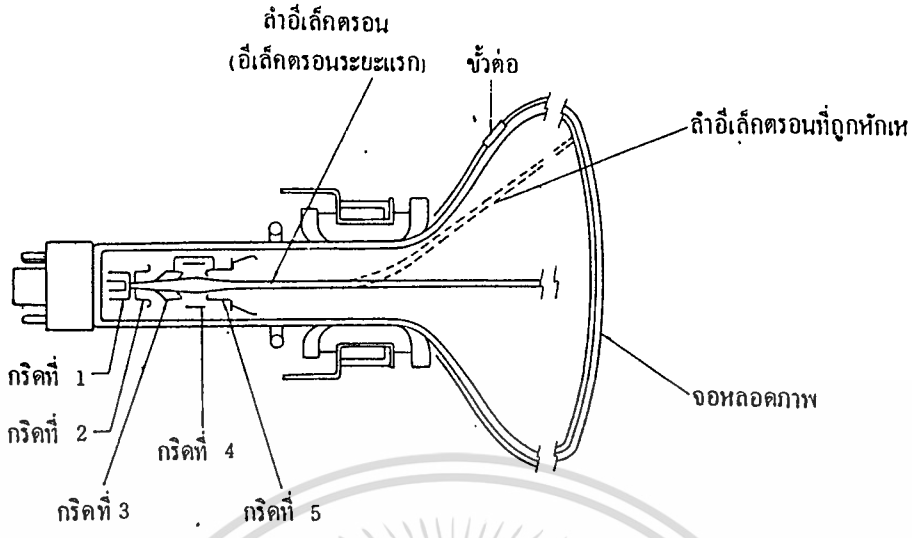


รูปที่ 6.1 แสดงผังการทำงานเฉพาะทางเดียว

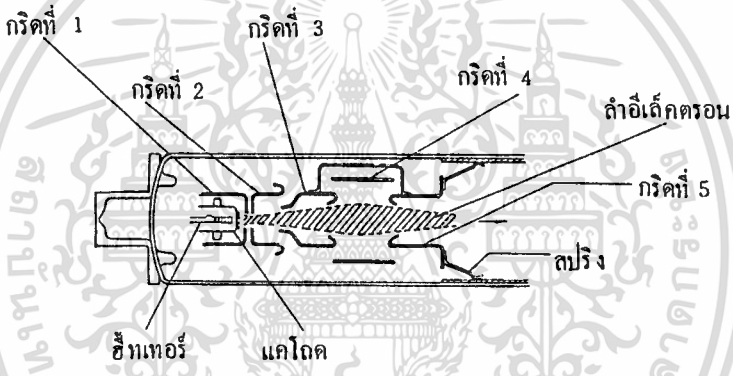
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


+ i/P
1M
5M
3M
1M
500K
100K
390K
10K
+15
-15
15V.
15V.
LM347N
5K
LM324
R
10K
10K
LM324
C
O/P
-i/P
1M
5M
3M
1M
500K
100K
390K
10K
LM347N
15V.
15V.
ONLY ONE AXIS

(ก) แม่เหล็กสำหรับใช้บังคับการหักเหของ
ลำอีเล็คตรอนให้วิ่งไปกระทบตรงกลางหลอด



(ข)

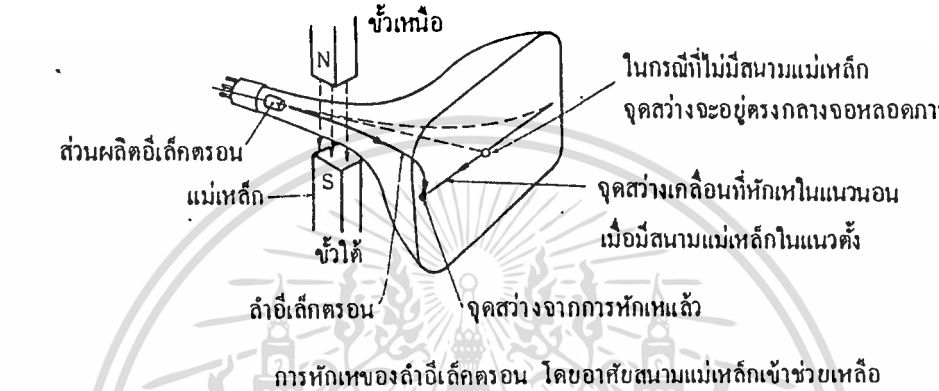


วิธีการสะแกนและการหักเหของลำอีเล็คตรอน

ภายในหลอดภาพของเครื่องรับโทรทัศน์ อีเล็คตรอนที่หลุดมาจากแคโถด และถูกดึงดูดให้วิ่งเป็นลำไปกระทบแอโนด หรือจอหลอดภาพ ซึ่งฉาบวัสดุเรืองแสงบางชนิดเอาไว้ จะทำให้เห็นเป็นจุดสว่างขึ้นที่จอ การสะแกนนี้ก็คือ การทำให้จุดสว่างนี้เคลื่อนที่ไปในจังหวะที่ถูกต้อง ทั้งในแนวนอนและแนวตั้งของจอหลอดภาพ โดยอาศัยความเข้มของสนามแม่เหล็กเข้าช่วยเหลือ ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 กล่าวคือ ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก ลำอีเล็คตรอนก็จะวิ่งไปกระทบจอหลอดภาพตรงกลางโดยไม่ถูกหักเหเลย หากต้องการเบนลำอีเล็คตรอนนี้ไปทางซ้ายมือในแนวนอน ก็จำเป็นต้องใช้สนามแม่เหล็กที่มีขั้วเหนือ-ขั้วใต้ อยู่ในแนวตั้ง ตามรูปที่ 3 หากกลับขั้วแม่เหล็กนี้เสีย ลำอีเล็คตรอนก็จะถูกแบนไปทางขวามือในแนวนอนของจอหลอดภาพ การที่ลำอิเล็คตรอนถูกแบนไปทางขวามือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือทางซ้ายมือของจอนี้ จะทำให้เปียจุดส่วางเคลื่อนที่ไปทางเดียวกันด้วย ในทำนองเดียวกัน หากมีขั้วแม่เหล็กในแนวนอน ลำอิเล็คตรอน หรือจุดสว่างก็จะถูกเบนไปทางแนวตั้งของจอหลอดภาพ



การหักเหของลำอิเล็คตรอน โดยอาศัยสนามแม่เหล็กเข้าช่วยเหลือ

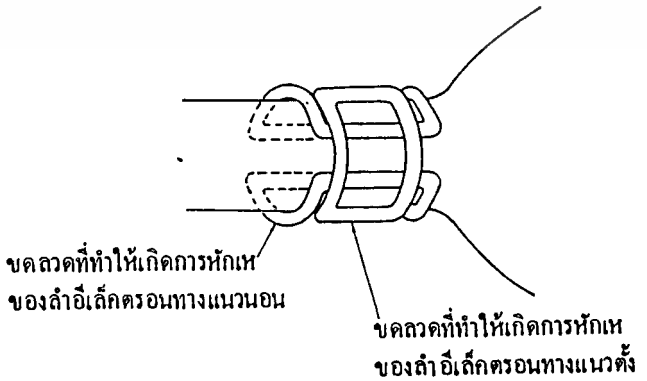
ฉะนั้นเพื่อช่วยในการหักเหลำอิเล็คตรอนในทิศทางที่ต้องการจึงนิยมใช้สนามแม่เหล็กทั้งในแนวนอน และแนวตั้งร่วมกันทั้งสองสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้เกิดจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดที่พันอยู่รอบๆคอหลอดภาพตามรูปที่ 5.4 ขดลวดเหล่านี้มีชื่อเรียกว่า ขดลวดของการหักเหทางแนวนอนและขดลวดของการหักเหทางแนวตั้งตามลำดับ รูปร่างของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดทั้งสองเพื่อจะทำให้เกิดการสะแกน ซึ่งโดยปกติ การสะแกนจะเริ่มต้นขึ้นโดยการทำให้จุดสว่างเคลื่อนที่จากซ้ายมือด้านบนของจอหลอดภาพไปทางขวามือในแนวนอน ซึ่งเมื่อไปถึงตำแหน่งขวาสุด ก็จะถูกเบนต่ำลงเล็กน้อย แล้วก็จะกลับไปตั้งต้นใหม่ทางซ้ายมือเพื่อเคลื่อนที่มาทางขวามืออีก เป็นเช่นนี้เรื่อยๆ จนกระทั่งจุดสว่างไปถึงตำแหน่งขวามือข้างล่างสุดของจอหลอดภาพ ก็เป็นอันเสร็จสิ้นการสะแกนภาพนิ่งภาพหนึ่ง หลังจากนั้นลำอิเล็คตรอนก็จะกลับไปตั้งต้นใหม่ทางด้านซ้ายมือบนสุดของจอหลอดภาพ เพื่อที่จะสะแกนภาพนิ่งอันดับต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้จอหลอดภาพโทรทัศน์ในการแสดงกราฟคุณสมบัติใน curve tracer นี้จะถูกmodifyให้มีคุณสมบัติการทำงานคล้ายการทำงานของoscilloscope ใน mode x-y ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหนึ่ง กับอีกค่าหนึ่ง

หลอดภาพของเครื่องรับโทรทัศน์

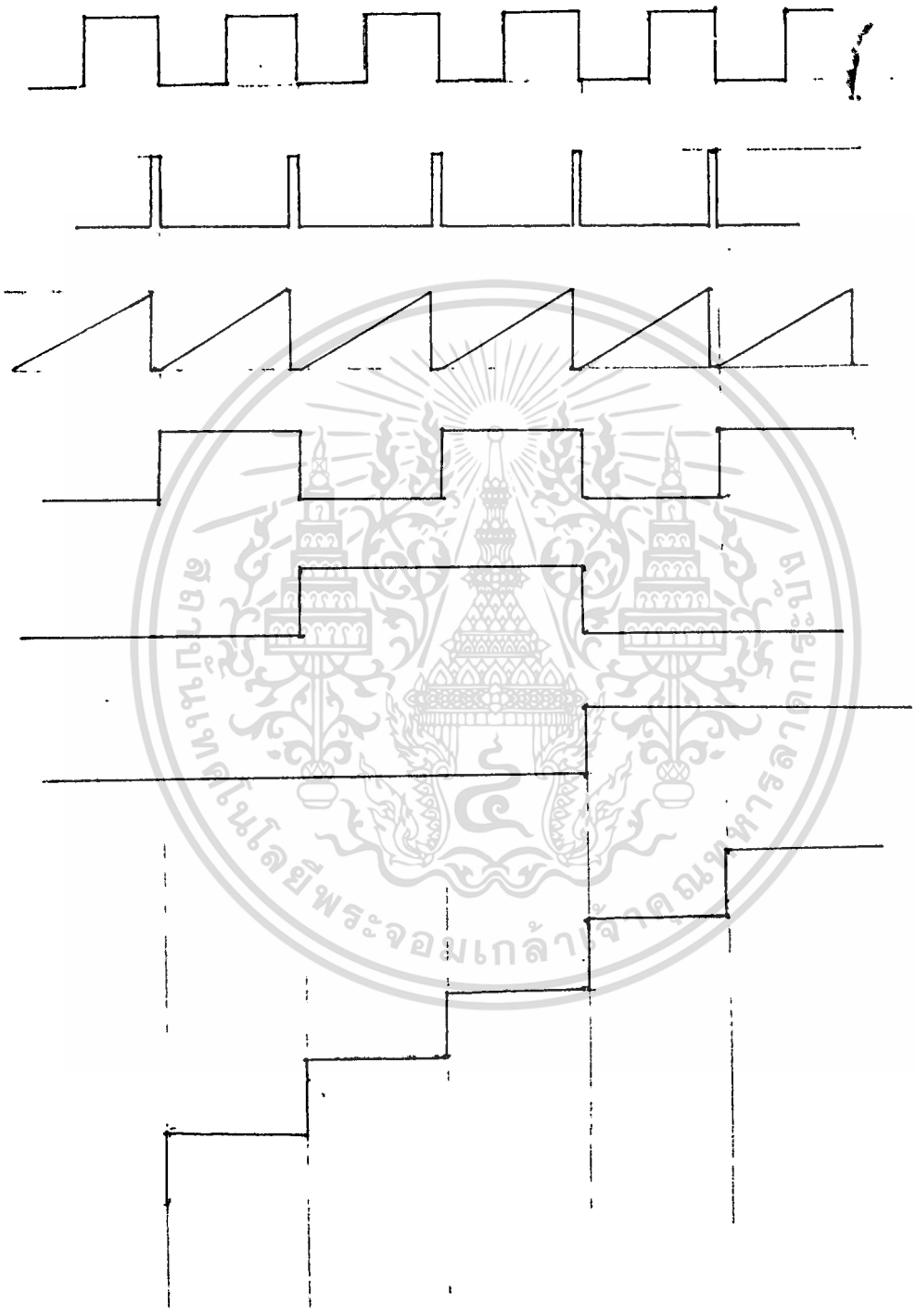
แคโทดหรือกริดของหลอดภาพจะเป็นส่วนบังคับควบคุมให้มีจำนวนอิเลคตรอนวิ่งไปกระทบจอหลอดภาพมากหรือน้อย และเกิดความเข้มของภาพมากน้อยตามขนาดของสัญญาณ หลอดภาพเป็นส่วนประกอบสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้เรามองเห็นภาพได้ รูปที่ 1 แสดงให้เห็นส่วนประกอบของหลอดภาพที่ใช้ในเครื่องรับโทรทัศน์ ส่วนประกอบที่สำคัญภายในหลอดภาพก็คือ ฮีทเทอร์ แคโถด กริด และ แอโนด หรือจอหลอดภาพที่ฉาบวัสดุเรืองแสงบางชนิดเอาไว้ กริดทุกอันมีรูปลักษณะยาวรีขนานกับแกนของจอหลอดภาพและมีรูเล็กๆที่ปลายทาง เมื่อแคโถดได้รับความร้อนก็จะให้อิเล็คตรอนออกมา กริดอันที่สองซึ่งโดยปรกติมีความต่างศักย์ ประมาณ 300-400 โวลท์ จะดึงดูดอิเล็คตรอนเหล่านี้และบังคับลำอิเล็คตรอนวิ่งผ่านรูเล็กๆที่ปลายทาง ต่อมาลำอิเล็คตรอนเหล่านี้ก็จะมีความเร็วเพิ่มขึ้นด้วยความต่างศักย์ประมาณ 10-18 กิโลโวลท์ ของกริดอันที่3 แล้วแต่ชนิดของหลอดภาพและก็จะพุ่งเข้าชนจอหลอดภาพทำให้เกิดการเรืองแสงขึ้นในที่สุด ขนาดของลำอิเล็คตรอนนี้ ขึ้นอยู่กับการปรับค่าความต่างศักย์ของกริดทั้ง 5 อัน ลำอิเล็คตรอนนี้จะถูกเบนหรือหักเหไปในทางแนวนอนและแนวตั้งก็ได้ แล้วแต่ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากการปล่อยให้กระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดที่พันอยู่รอบๆคอหลอดภาพที่กล่าวถึงแล้ว



การวางตำแหน่งของขดลวด เพื่อทำให้เกิดการหักเหของลำอีเล็กตรอนทางแนวนอน และการหักเหของลำอีเล็กตรอนทางแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง แสดงรูปสัญญาณที่จุดต่างๆของวงจรที่ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลและวิจารณ์

จากการทดลองจะสามารถสรุปข้อดี และข้อเสียของส่วนสร้างสัญญาณออกออสซิโลสโคปได้คือ

1. สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในสัญญาณกระแสสลับ และสัญญาณรบกวนในสัญญาณขั้นบันได จะทำให้เราไม่สามารถแสแกนอุปกรณ์ที่โวลเตจที่ค่าต่ำมากได้ การแก้ไขคือ จะต้องลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากวงจรขยาย และที่เกิดจากสัญญาณขั้นบันไดก่อนที่จะเข้าวงจรขยาย

2. เมื่อสแกนสัญญาณเกินกว่า 10 เส้น ภาพที่ออกจากออสซิโลสโคป จะเกิดอาการสั่นเนื่องจากภาพเกิดการเปลี่ยนแปลงช้าจนสายตาเห็นการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโอด (DIODE)

ไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเลคทรอนิก ที่มีผู้รู้จักมานานแล้ว ไดโอดเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของวงจรอีเลคทรอนิก ทั่วไป ในสมัยก่อนไดโอดมักจะเป็นแบบหลอดสูญญากาศ ปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี่เป็นไปอย่างรวดเร็ว จึงทำให้สิ่งประดิษฐ์ชนิดใหม่ซึ่งทำด้วยสารกึ่งตัวนำได้เข้ามาแทนที่หลอดสูญญากาศ ไดโอดที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำมีสองขั้ว และมีขนาดเล็กใช้งานได้ง่าย เราจะได้เรียนรู้ถึงไดโอดชนิดต่างๆ ซึ่งพบเห็นกันในปัจจุบัน ทั้งในวงจรทั่วไป วงจรภาคแสดง (Display Unit) และทางด้านไมโครเวฟ ในที่นี้จะเน้นหนักเกี่ยวกับลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ แรงดัน กระแส ผลของอุณหภูมิและการใช้งานอย่างง่ายๆ

ชนิดของไดโอด

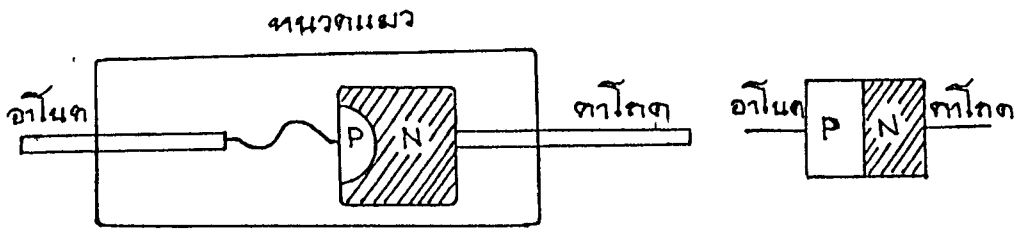
ไดโอดที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ แบ่งได้ตามชนิดของเนื้อสารที่ใช้ เช่น เป็นชนิดเยอรมันเนียมหรือชนิดซิลิกอน นอกจากนี้ไดโอดยังแบ่งตามลักษณะ ตามกรรมวิธีที่ผลิตคือ.-

1. ไดโอดชนิดจุดสัมผัส (Point-Contact Diode) ไดโอดชนิดนี้เกิดจากการนำเอาสารเยอรมันเนียมชนิดN มาแล้วอัดสายเล็กๆ ซึ่งเป็นลวดพลาตินัม (Platinum) เส้นหนึ่งเข้าไป (เรียกว่าหนวดแมว) จากนั้นจึงให้กระแสค่าสูงๆ ไหลผ่านรอยต่อระหว่างสาย และผลึก จะทำให้เกิดสารชนิดP ขึ้นรอบๆรอยสัมผัสในผนึกเยอรมันเนียม ดังรูปที่ 1 บางทีก็เรียกไดโอดชนิดนี้ว่า ไดโอดชนิด หนวดแมว ซึ่งนิยมใช้ในวงจรดีเทคเตอร์ และวงจรมิกเซอร์ แต่เนื่องจากลักษณะสมบัติของแรงดันและกระแสไม่แน่นอน จึงไม่เหมาะสมสำหรับงานด้านอีเลคทรอนิก ทั่วไป

2. ไดโอดชนิดหัวต่อ P-N (P-N Junction Diode) เป็นไดโอดที่สร้างขึ้นจากการนำเอาสารกึ่งตัวนำชนิดN มาแล้วแพร่อนุภาคอะตอมของสารบางชนิดเข้าไปในเนื้อสาร เกิดเป็นสารP ขึ้นบางส่วน แล้วจึงต่อขั้วออกใช้งาน ไดโอดชนิดนี้มีบทบาทในวงจรอีเลคทรอนิก. และมีที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

ในบทนี้จะกล่าวถึงไดโอดชนิดหัวต่อ P-N เท่านั้น

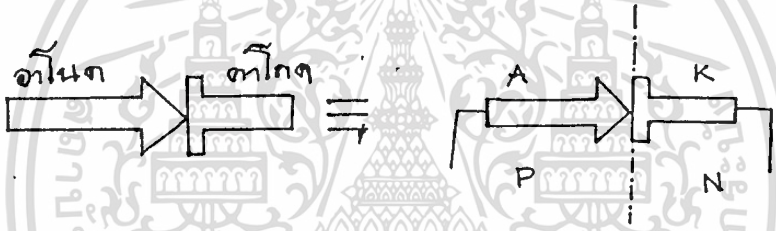
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1. ลักษณะโครงสร้างของไดโอดชนิดจุดสัมผัสและชนิดหัวต่อ P-N

ลักษณะสมบัติของไดโอด

ไดโอดที่ใช้ในวงจรมีสัญญลักษณ์ เป็นรูปลูกศรมีขีดขวางไว้ ดังรูปที่2



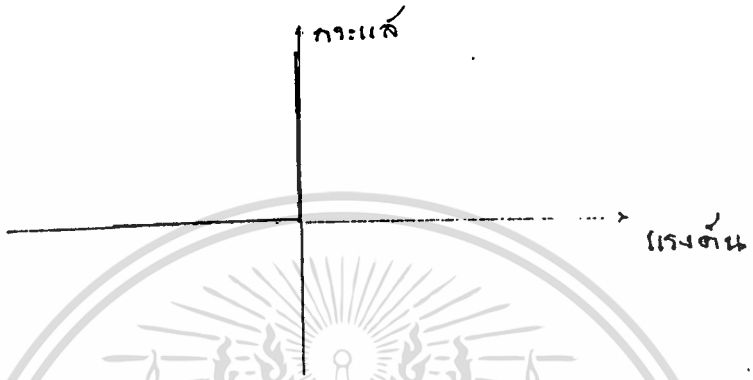
รูปที่ 2. สัญญลักษณ์ของไดโอดและวิธีดูขั้วของไดโอด

ตัวลูกศรเป็นสัญญลักษณ์แทนสารกึ่งตัวนำชนิดP ซึ่งเป็นขั้วอาโนด(ขั้วบวก) ของไดโอด ลูกศรจะชี้ในทิศทางที่โฮลเคลื่อนที่ ส่วนขีดคั่นเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดN ซึ่งเป็นขั้วคาโถด (ขั้วลบ) ดังนั้นเราจะสามารถพิจารณาว่าไดโอดไบแอสตรง หรือไบแอสกลับได้ง่ายๆ โดยพิจารณาดูว่าถ้าขั้วอาโนดมีศักดาไฟฟ้าเป็นบวกมากกว่าขั้วคาโถดแล้ว ไดโอดจะถูกไบแอสตรง ถ้าขั้วอาโนดมีศักดาไฟฟ้าเป็นบวกน้อยกว่าคาโถด ก็แสดงว่าไดโอดถูกไบแอสกลับ

โดยทั่วไปเราถือว่าขณะที่ไดโอดถูกไบแอสตรง เปรียบเสมือนว่าเกิดลัดวงจรตรงส่วนที่เป็นไดโอด ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านไดโอดจึงมีค่าสูง และถือว่าแรงดันคร่อมไดโอดเป็นศูนย์ แต่ขณะที่ไดโอดถูกไบแอสกลับจะเปรียบเสมือนว่าเป็นวงจรเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะไม่มีกระแสไหลผ่านเลยและแรงดันคร่อมไดโอดจะมีค่าเท่ากับแรงดันไบแอสกลับที่ป้อน ให้กับไดโอด ไดโอดที่มีคุณสมบัติเช่นนี้เราเรียกว่า ไดโอดอุดมคติ (Ideal diode) แต่ในไดโอดที่มีใช้อยู่จริงๆ ขณะที่ถูกไบแอสตรงจะมีกระแสไหลผ่านได้สูง และมีแรงดันคร่อมไดโอดเพียงเล็กน้อยอยู่ในช่วงประมาณ 0.1 ถึง 1.5 โวลท์ ส่วนขณะถูกไบแอสกลับจะมีกระแสไหลผ่านน้อยมากเพียงไม่กี่ไมโครแอมแปร์



รูป 3. ลักษณะสมบัติของไดโอดอุดมคติ

ตารางเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของไดโอดเมื่อไบแอสตรงและไบแอสกลับ

ไบแอสตรง	ไบแอสกลับ
1.มีกระแสไหลผ่านไดโอด	1.ไม่มีกระแสไหลผ่านไดโอด
2.ถือว่าไดโอดมีความต้านทานน้อยมาก	2.ถือว่าไดโอดมีความต้านทานสูง
3.โดยทั่วไปถือว่าไดโอดลัดวงจร	3.โดยทั่วไปถือว่าไดโอดเปิดวงจร

ลักษณะสมบัติระหว่างแรงดันและกระแสของไดโอด

เนื่องจากความต้านทานของตัวไดโอดขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงถือว่าสิ่งประดิษฐ์ไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ให้คุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น

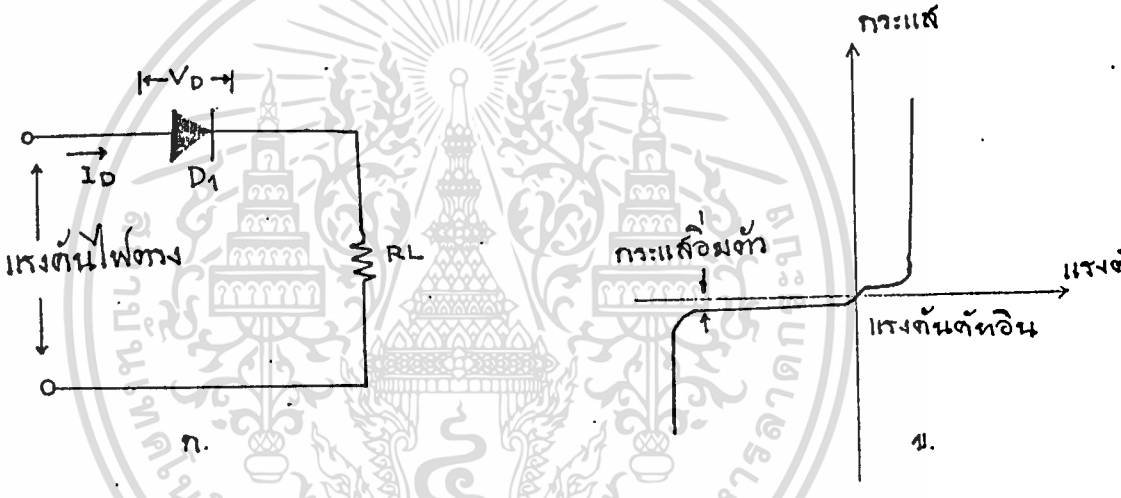
ลักษณะสมบัติระหว่างแรงดันและกระแสจะเป็นตัวแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวไดโอด (I/D) กับค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวไดโอด (V/D) ทั้งในทิศทางไบแอสตรงและไบแอสกลับดังแสดงในรูปที่ 4 ค่าของแรงดันที่คร่อมไดโอดจะมีค่าเป็นบวกเมื่อไบแอสตรง และเป็นลบเมื่อไบแอสกลับ

ลักษณะสมบัติทางด้านไบแอสตรงจะเริ่มมีกระแสไหลผ่านไดโอด เมื่อใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันแก่ไดโอดด้วยค่าๆ หนึ่งแรงดันนี้คือแรงดันที่เราเรียกว่า แรงดันคัทอิน (cutin voltage) ของไดโอด (โดยทั่วไปถือว่ากระแสเริ่มจะไหลได้จะต้องมีค่าประมาณ 1% ของกระแสสูงสุดที่ไดโอดจะทนได้)

เส้นกราฟทางด้านไบแอสกลับจะเกือบทับกับแกน V/D เพราะว่ายังมีกระแสไหลได้อยู่บ้างแต่มีค่าน้อยมาก กระแสส่วนนี้เรียกว่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (reverse saturation current) และเมื่อเพิ่มแรงดันไบแอสกลับจะเกิดลักษณะพิเศษบางอย่างขึ้น คือจะเกิดมีกระแสไหลได้มากโดยที่แรงดันไม่เปลี่ยนแปลงและจะทำให้ไดโอดพัง จึงเรียกแรงดันนี้ว่าแรงดันพัง (breakdown voltage) ดังนั้นในการใช้งาน ถ้าแรงดันด้านไบแอสกลับมีค่าเกินกว่าแรงดันพัง (V/z) จะเป็นอันตรายต่อไดโอด



รูป 5.กระแสของวงจรไบแอสในรูป (ก) แสดงลักษณะกราฟสมบัติระหว่าง แรงดัน (ข)

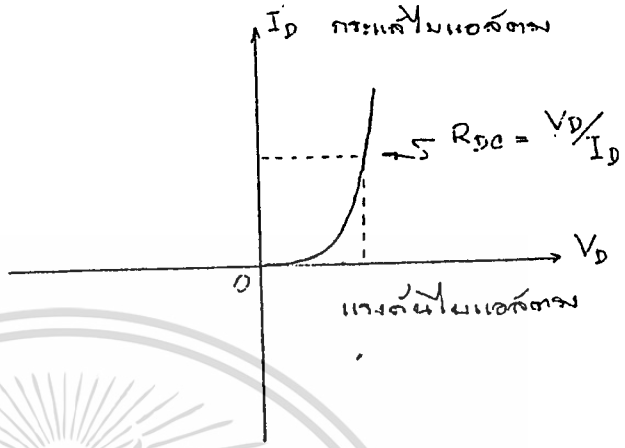
พิจารณาการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านไบแอส ตรงกับอุณหภูมิตามทฤษฎีตรงจุดแรงดันคัทอิน (Cutin Voltage) การเปลี่ยนแปลงของแรงดันจะมีค่าลดลง 2.1 มิลลิโวลท์ต่อองศาเซนติเกรด สำหรับไดโอดชนิดเยอรมันเนียม และลดลง 2.3 มิลลิโวลท์ต่อองศาเซนติเกรดสำหรับซิลิกอนไดโอด ในทางปฏิบัติใช้ค่าเฉลี่ยประมาณ 2.5 มิลลิโวลท์ ซึ่งก็ปลอดภัยในการออกแบบ

<u>ความต้านทานในตัวไดโอด</u>

ความต้านทานในตัวไดโอดพอที่จะแบ่งออกตามชนิดของแรงดันที่ให้กับตัวไดโอด ซึ่งแยกออกเป็นความต้านทานทางไฟตรง หรือทางสแตติกและความต้านทานทางไฟสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานทางไฟตรง (Static resistance) จากลักษณะสมบัติแรงดัน และกระแสของไดโอด จะไม่เป็นลักษณะเชิงเส้น ดังนั้นความต้านทานในตัวไดโอดจึงไม่คงที่ จากกฎของโอห์มจะได้ความต้านทานทางไฟตรงที่จุดทำงานขณะไม่มีสัญญาณอื่นใดเข้ามาเป็น $R_{DC} = V_D/I_D$



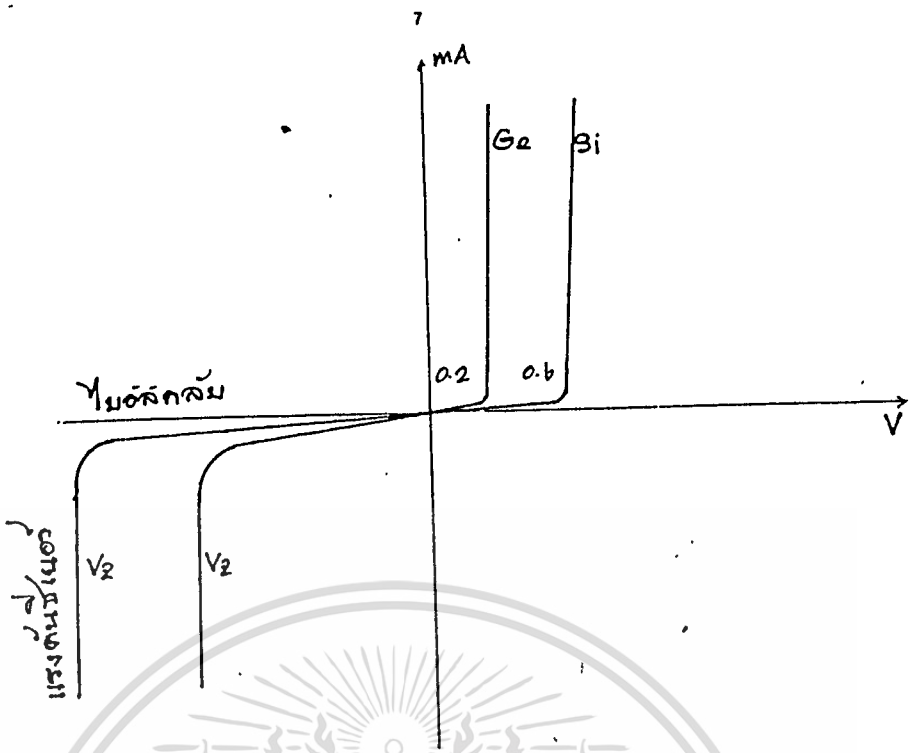
รูปที่ 6 แสดงค่าความต้านทานในไดโอดทางไฟตรง

ความต้านทานไฟตรง หรือความต้านทานสแตติกของไดโอดตัวเดียวกันอาจไม่เท่ากันก็ได้ ถ้าจุดทำงานสำหรับไฟตรงเปลี่ยนไปอันเนื่องมาจากแรงดันไฟตรงคร่อมไดโอดเปลี่ยนแปลงหรือมีการเปลี่ยนโหลด ในกรณีที่จุดทำงานเลื่อนไปทางด้านที่กระแสมากขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานไฟตรงลดลง เพราะที่จุด $R_{dc} = V/I$ I เพิ่มขึ้นกราฟจะชันกว่าเดิม คือที่จุดนี้กระแสไหลผ่านไดโอดจะมีค่ามากขึ้นกว่าเดิม แต่แรงดันสูงขึ้นไม่มากนัก จึงทำให้ความต้านทานไฟตรงน้อยลง

จากข้อมูลที่ผู้ผลิตให้มาจะบอกค่าแรงดันไบแอสตรงสูงสุด V_{fmax} และกระแสไบแอสกลับสูงสุด I_{rmax} ไว้ จะหาความต้านทานไฟตรงได้ต้องรู้ลักษณะแรงดัน และกระแสเพื่อจะหาค่ากระแสขณะไบแอสตรง If ที่จุดกำหนด Vf ได้ เมื่อทราบค่า If ก็สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานทางไฟตรงได้ และถ้าจะหาความต้านทานไฟตรงทางไบแอสกลับ ต้องรู้ค่าแรงดัน Vr ณ.จุดทำงาน ค่ากระแส Ir ซึ่งกำหนดไว้โดยดูจากกราฟลักษณะสมบัติ ตัวอย่างเช่น ซิลิกอนไดโอดมี Vf=0.8V,Ir=0.1 A สมมุติว่าดูจากลักษณะสมบัติได้ If=10A และ Vr=50V คำนวณค่าความต้านไฟตรงจากสูตร $R_{dc}=V/I$

เนื่องจากไดโอดชนิดหัวต่อ D-N แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดซิลิกอน และชนิดเจอร์มันเนียม ดังนั้นลักษณะสมบัติทางแรงดันและกระแสของไดโอดทั้งสองชนิด จะเห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5. เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของซิลิคอน และเยอรมันเนียมไดโอด

ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับสำหรับซิลิคอนไดโอด กับของเยอรมันเนียมไดโอดยังมีค่าไม่เท่ากันด้วย ซิลิกอนไดโอดมีค่ากระแสอิ่มตัวน้อยกว่าของเยอรมันเนียมไดโอดประมาณ 1000 เท่า

สำหรับค่าแรงดันคัทอินทั้งของซิลิกอน และเยอรมันเนียมจะมีค่าไม่เท่ากัน ค่าแรงดันคัทอินของซิลิกอนไดโอดมีค่าประมาณ 0.6 โวลท์ ส่วนของเยอรมันเนียมไดโอดมีค่าประมาณ 0.2 โวลท์ ส่วนแรงดันพังเมื่อไม่คิดเครื่องหมายแรงดัน แล้วแรงดันพังของเยอรมันเนียมไดโอดจะมีค่าน้อยกว่าของซิลิกอนไดโอด

<u>ผลของอุณหภูมิที่มีต่อไดโอด</u>

เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อลักษณะสมบัติทางแรงดัน และกระแสของไดโอด เนื่องจากสารกึ่งตัวนำจะมีจำนวนโฮล และอีเลคตรอนอิสระที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในการออกแบบวงจรจึงจำเป็นต้องทราบว่า กระแสไดโอดเมื่อไบแอสกลับจะเปลี่ยนแปลงอย่างไรกับอุณหภูมิ และแรงดันคร่อมไดโอดขณะไบแอสตรงจะเปลี่ยนอย่างไรกับอุณหภูมิ เมื่อกระแสที่ไหลผ่านไดโอดคงที่

พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสทางด้านไบแอสกลับเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น กระแสอิ่มตัวในไดโอดจะเกิดการเปลี่ยนแปลง สมการของกระแสอิ่มตัว ซึ่งหาได้โดยวิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

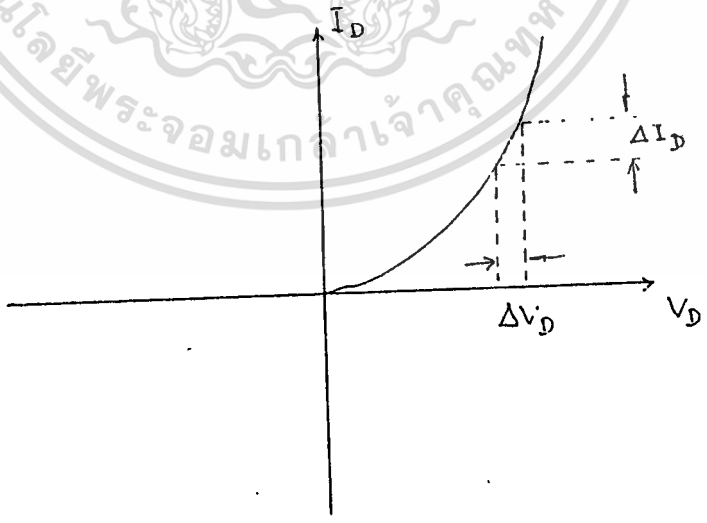
การทางเทคโนโลยีของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะได้สูตรยุ่งยาก และไม่จำเป็นต้องนำมากล่าว ณ.ที่นี้ อย่างไรก็ตามจากสมการของกระแสอิ่มตัวทางคณิตศาสตร์พบว่า การเปลี่ยนแปลงของกระแสอิ่มตัวจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิประมาณ 7% ทุกๆ องศาเซนติเกรด หรือเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของๆ เดิมทุกๆ 10 องศาเซนติเกรด

ขณะไบแอสตรง $R_{DC} = \frac{0.8}{10\times10^{-3}} = 80$

ขณะไบแอสกลับ $R_{DC} = \frac{50}{0.1\times10^{-1}} = 500$

ความต้านทานทางไฟสลับ (Dynamic resistance) เมื่อไดโอดทำงานในขณะที่มีค่าสัญญาณแรงดันไฟสลับขนาดเล็กๆ ป้อนเข้ามาค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นที่ไดโอด จะเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ค่าความต้านทานนี้จะแตกต่างจากความต้านทานทางไฟตรง เราเรียกค่าความต้านทานนี้ว่า ความต้านทานทางไฟสลับ การหาค่าความต้านทานทางไฟสลับ หาค่าได้จากอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของแรงดันคร่อมตัวไดโอดที่เปลี่ยนไปกับค่า การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลในตัวไดโอด

เนื่องจากการทำงานของไดโอด เมื่อสัญญาณเข้ามา ณ.จุดที่ไดโอดทำงานก็จะมีค่าไม่คงที่ ไม่แน่นอน เกิดการเปลี่ยนแปลงตามลักษณะสมบัติ แต่เมื่อคิดการเปลี่ยนแปลงกระแสไบแอสตรงค่าเล็กๆ ของกระแส และแรงดันแล้วจะสามารถหาค่าความต้านทานทางไดนามิก หรือความต้านทานต่อไฟสลับได้ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7.แสดงการหาความต้านทานทางไฟสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าความต้านทานนี้อาจทำได้โดยการใช้สูตร

$$R_{ac} = \frac{\text{ช่วงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันคร่อมไดโอด}}{\text{ช่วงการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านไดโอด}}$$

$$\frac{V_d}{I_d}$$

การพังในตัวไดโอด

คงยังจำได้ว่าเมื่อทำการไบแอสตัวไดโอดแบบไบแอสกลับ ไดโอดจะมีคุณสมบัติเหมือนกับตัวต้านทานที่มีค่าสูงมาก จึงมีกระแสจากพาหะส่วนน้อยไหลผ่านตัวไดโอดที่เรียกว่า กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ได้น้อย แต่เมื่อเพิ่มแรงดันไบแอสกลับให้กับไดโอดจนถึงค่าหนึ่งที่เรียกว่า แรงดันพังทลาย (breakdown voltage) หรือ แรงดันซีเนอร์ (Zener voltage) อีเลคตรอนในไบโอดจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันนี้มากพอที่จะหลุดจากอะตอมแล้ว วิ่งไปชนอีเลคตรอนตัวอื่นให้หลุดจากอะตอมด้วย อีเลคตรอนที่หลุดออกมาก็รับพลังงานจากแรงดันไบแอสกลับ แล้ววิ่งไปชนอีเลคตรอนตัวอื่นต่อไปให้หลุดออกมาอีก เป็นเช่นนี้เรื่อยไป ดังนั้นจึงมีอีเลคตรอนอิสระหลุดออกจากอะตอมเป็นจำนวนมาก การเคลื่อนที่ของอีเลคตรอนจำนวนมากนี้ทำให้เกิดกระแสย้อนกลับไหลผ่านไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เหมือนกับว่าไดโอดลดค่าความต้านทานภายในตัวของมันเองอย่างทันทีทันใด ปรากฏการเช่นนี้เรียกว่า การพังแบบถาวาลานซ์ (avalance breakdown) หรือ การพังแบบซีเนอร์ (Zener breakdown) กระแสย้อนกลับในขณะนี้มักจะไหลผ่านรอยต่อของไดโอดไม่เท่ากันทุกจุด จุดใดที่กระแสไหลมากก็จะได้รับความร้อนมาก จนรอยต่ออาจทะลุได้ทำให้หมดสภาพการเป็นไดโอด

นอกจากนี้การพังไดโอดยังเกิดขึ้นได้อีกเมื่ออุณหภูมิของตัวไดโอดมีค่าสูงมากๆ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการเพิ่มของกระแสอย่างรวดเร็ว ปรากฏการณ์เช่นนี้อาจเกิดขึ้นได้เมื่อให้กระแสไบแอสตรงมีค่าสูงมากๆ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ทัน ซึ่งเรียกว่าการเพิ่มหนีของอุณหภูมิ ตัวไดโอดจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระแสที่ไหลผ่านตัวมันเกินขีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
023239

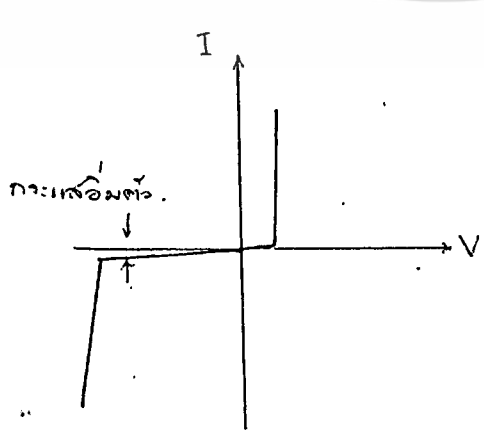
จำกัด อาจทำให้ไดโอดพังเสียหายได้

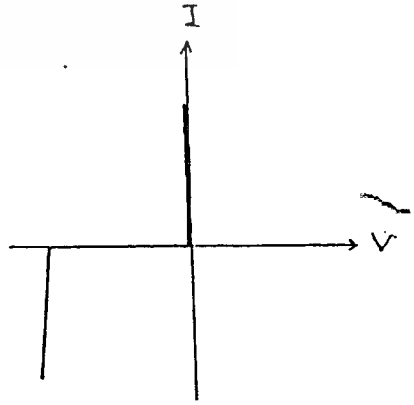
ซีเนอร์ไดโอด

ไดโอดธรรมดาเมื่อทำการไบแอสกลับจนถึงค่าแรงดันพัง จะทำให้เกิดการเสียหายได้ ซีเนอร์ไดโอดเป็นซิลิกอนไดโอดชนิดพิเศษที่กระแสย้อนกลับ สามารถไหลเฉลี่ยตลอดทั่วพื้นที่รอยต่อของไดโอด จึงสามารถทนกระแสย้อนกลับได้สูงมาก ดังนั้น ซีเนอร์ไดโอดจึงสามารถใช้ควบคุมแรงดันโดยใช้แรงดันที่ตกคร่อมตัวมันเองเป็นตัวควบคุม สัญญลักษณ์ของตัวซีเนอร์ไดโอดเขียนได้ดังรูปที่ 8.

รูปที่ 8. สัญญลักษณ์ของซีเนอร์ไดโอด

ซีเนอร์ไดโอดทางอุดมคติจะควบคุมแรงดันได้ต่อเมื่อถูกไบแอสกลับ กล่าวคือ จะมีกระแสไหลผ่านไดโอดได้ก็ต่อเมื่อไบแอสกลับจนถึงค่าแรงดันซีเนอร์เท่านั้น สำหรับกรณีไบแอสตรง ซีเนอร์ไดโอดจะทำหน้าที่เหมือนไดโอดธรรมดา คือ เสมือนกับเป็นตัวลัดวงจรดังลักษณะสมบัติดังนี้





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 9.ลักษณะสมบัติของซีเนอร์ไดโอดทางอุดมคติ
ลักษณะสมบัติของซีเนอร์ไดโอดจริงๆ

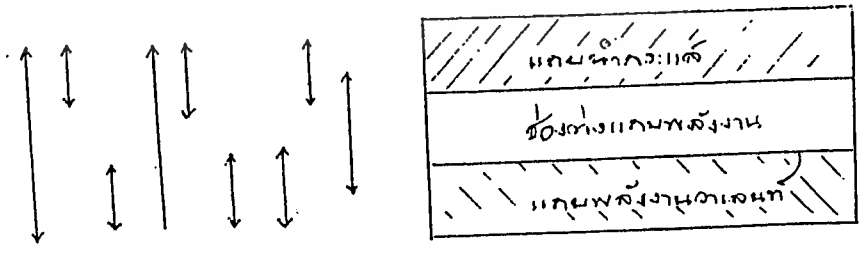
ลักษณะสมบัติทางด้านไบแอสกลับจะปรากฏแรงดันคร่อมซีเนอร์ไดโอด มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากค่าแรงดันซีเนอร์เล็กน้อย เมื่อกระแสไหลผ่านไดโอดมากๆ ทางด้านไบแอสตรงก็มีลักษณะสมบัติคล้ายไดโอดธรรมดาที่ถูกไบแอสตรง แม้ว่าแรงดันตกคร่อมตัวซีเนอร์ไดโอดจะไม่ถึง แรงดันซีเนอร์ก็มีกระแสจำนวนเล็กน้อยไหลผ่านได้ เป็นกระแสรั่วไหลดังแสดงในรูปลักษณะสมบัติข้างต้น

ดังนั้นการใช้ซีเนอร์ไดโอดจำเป็นต้องใช้ข่วงของแรงดันซีเนอร์ให้เป็นประโยชน์ โดยให้กระแสไหลเข้าทางด้านโดดไปออกทางอาโนด เพื่อมันจะทำงานในขณะไบแอสกลับ การผลิตซีเนอร์ไดโอดให้มีค่าแรงดันซีเนอร์ไดโอดต่างๆ กัน ใช้วิธีการโด๊บสารเจือปนให้มากน้อยต่างกัน ถ้าโด๊บมากค่าแรงดันซีเนอร์ต่ำ โด๊บน้อยค่าแรงดันซีเนอร์สูง โดยทั่วไปซีเนอร์ไดโอดจะมีค่าแรงดันซีเนอร์ใช้งานได้ดี ในย่าน 2.4 ถึง 200 โวลท์ ความคลาดเคลื่อน 5% ถึง 20% ทนได้กำลังได้ตั้งแต่ 1/4 วัตต์ ถึง 50 วัตต์

ผลของทันเนล

การพังแบบอาวาลานช์ (avalance breadown) ขึ้นอยู่กับพลังงานที่วาเลนซ์อีเลคตรอนในสารกึ่งตัวนำที่ได้รับเพิ่มขึ้น ทำให้มันสามารถหลุดออกมาจากบอนด์ได้

อีเลคตรอนที่มีพลังงานอยู่ในแถบวาเลนซ์ไม่สามารถที่จะหลุดออกมาจากการเกาะเกี่ยวกับอะตอมข้างเคียงได้ ระดับแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่แสดงพลังงานที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ แถบต้องห้ามและแถบนำกระแส ดังรูป



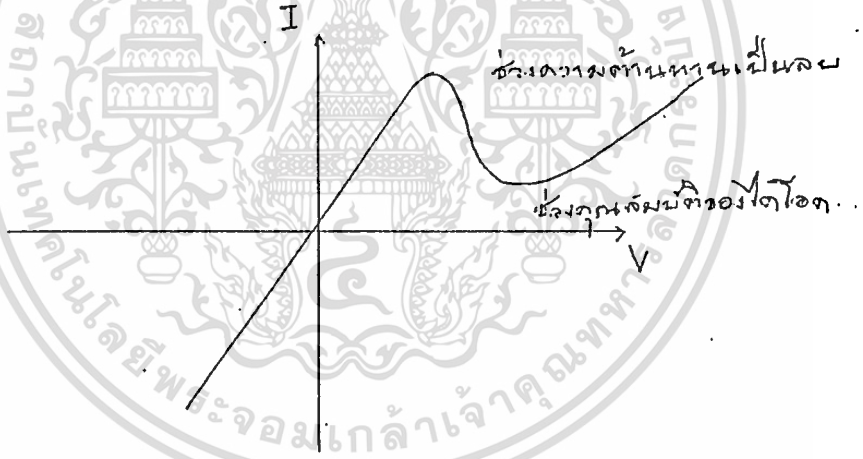
รูป 10.อีเลคตรอนบางตัวจะได้รับพลังงานและจะเคลื่อนจากแถบพลังงานวาเลซ์ไปสู่แถบนำกระแสเป็นผลของทันเนล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีเลคตรอนจะมีพลังงานอยู่ในแถบใดก็ได้ ดังนั้นจึงมีอีเลคตรอนเคลื่อนที่อยู่ [illegible] และทำให้เกิดโฮลด้วย เมื่ออีเลคตรอนอิสระเข้าไปแทนที่โฮลก็จะเกิดการ [illegible] ระดับพลังงานโดยมันจะคลายพลังงานออกให้กับอีเลคตรอนตัวอื่น และมี [illegible] ตรอนอีกเป็นจำนวนมากที่มีพลังงานสูงอยู่ในแถบต้องห้าม เมื่อมันได้รับพลังงาน [illegible] ไปอีกมันอาจจะอยู่ในแถบของการนำกระแสได้ แต่เมื่อทำการโด๊ปสารกึ่งตัวนำ [illegible] และ N อย่างสูง จะทำให้มีอีเลคตรอนและโฮลเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเมื่อ [illegible] ดันเพียงเล็กน้อยอีเลคตรอนก็สามารถเข้ามาอยู่ในแถบนำกระแสได้ และข้าม [illegible] ข้ามา

<u>[illegible] ไดโอด</u>

ทันเนลไดโอด (Tunnel diode) ต่างจากไดโอดธรรมดาตรงที่ลักษณะ [illegible] แรงดันและกระแสบางช่วงเป็นแบบความต้านทานลบ กล่าวคือเมื่อเพิ่มแรงดันจะ [illegible] ทำหนึ่งแทนที่กระแสจะสูงขึ้น มันกลับลดลงดังแสดงในรูปที่ 11.



รูปที่ 11. ลักษณะสมบัติของทันเนลไดโอด

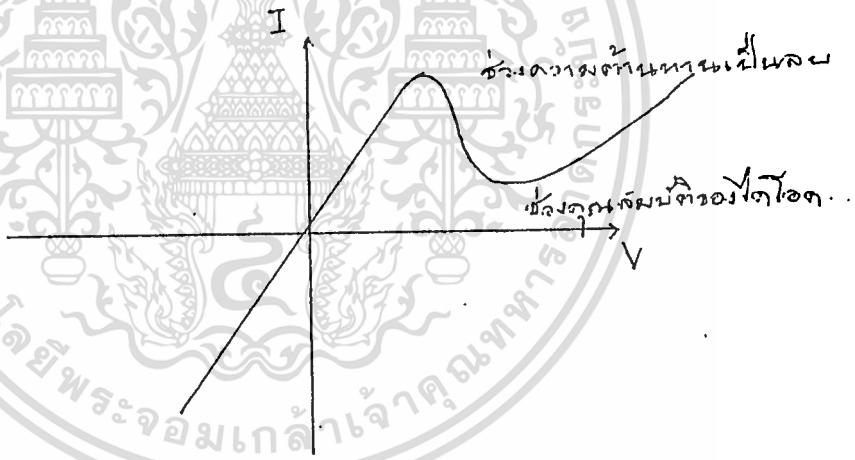
เหตุที่ลักษณะสมบัติบางช่วงเป็นความต้านทานลบ เพราะว่ามีการโด๊ปสาร [illegible] ด้านหนึ่งของหัวต่อ P-N ให้มีสารเจือปนมากกว่าปกติ ถึงเป็นร้อยเท่า พันเท่า [illegible] โด๊ปมากๆ เช่นนี้ทำให้หัวต่อที่เรียกว่า ดีพลีชั่นบางมาก เมื่อให้ไบแอสตรงจึงทำ [illegible] สามารถวิ่งทะลุรอยต่อไปยังขั้วอีกด้านหนึ่งได้ ดังนั้นกระแสจะสูงขึ้นจนถึงค่า [illegible] รูปที่ 11.) หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มแรงดันอีก กระแสจะลดลงเพราะพาหะที่วิ่ง [illegible] ลดน้อยลงจนถึงค่า ค่าหนึ่ง พอเพิ่มแรงดันสูงกว่านี้อีกจะเป็นลักษณะแบบ [illegible] ธรรมดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีเลคตรอนจะมีพลังงานอยู่ในแถบใดก็ได้ ดังนั้นจึงมีอีเลคตรอนเคลื่อนที่อยู่ในเนื้อสารและทำให้เกิดโฮลด้วย เมื่ออีเลคตรอนอิสระเข้าไปแทนที่โฮลก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานโดยมันจะคลายพลังงานออกให้กับอีเลคตรอนตัวอื่น และมีอีเลคตรอนอีกเป็นจำนวนมากที่มีพลังงานสูงอยู่ในแถบต้องห้าม เมื่อมันได้รับพลังงานสูงขึ้นไปอีกมันอาจจะอยู่ในแถบของการนำกระแสได้ แต่เมื่อทำการโด๊บสารกึ่งตัวนำทั้ง P และ N อย่างสูง จะทำให้มีอีเลคตรอนและโฮลเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเมื่อป้อนแรงดันเพียงเล็กน้อยอีเลคตรอนก็สามารถเข้ามาอยู่ในแถบนำกระแสได้ และข้ามรอยต่อเข้ามา

<u>ทันเนลไดโอด</u>

ทันเนลไดโอด (Tunnel diode) ต่างจากไดโอดธรรมดาตรงที่ลักษณะสมบัติแรงดันและกระแสบางช่วงเป็นแบบความต้านทานลบ กล่าวคือเมื่อเพิ่มแรงดันจะเกิดค่าค่าหนึ่งแทนที่กระแสจะสูงขึ้น มันกลับลดลงดังแสดงในรูปที่ 11.



รูปที่ 11. ลักษณะสมบัติของทันเนลไดโอด

เหตุที่ลักษณะสมบัติบางช่วงเป็นความต้านทานลบ เพราะว่ามีการโด๊บสารด้านใดด้านหนึ่งของหัวต่อ P-N ให้มีสารเจือปนมากกว่าปกติ ถึงเป็นร้อยเท่า พันเท่า ซึ่งการโด๊บมากๆ เช่นนี้ทำให้หัวต่อที่เรียกว่า ดิพลีชั่นบางมาก เมื่อให้ไบแอสตรงจึงทำให้พาหะสามารถวิ่งทะลุรอยต่อไปยังขั้วอีกด้านหนึ่งได้ ดังนั้นกระแสจะสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุด (ดูรูปที่ 11.) หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มแรงดันอีก กระแสจะลดลงเพราะพาหะที่วิ่งทะลุรอยต่อลดน้อยลงจนถึงค่า ค่าหนึ่ง พอเพิ่มแรงดันสูงกว่านี้อีกจะเป็นลักณะแบบไดโอดธรรมดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับทรานซิสเตอร์

นับตั้งแต่ปี พ.ศ.2488 เป็นต้นมา เทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำก็ได้รับการค้นคว้าพัฒนาอย่างกว้างขวาง อุปกรณ์อิเลคทรอนิกที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ ได้มีผู้ทะยอยค้นคิดเป็นจำนวนมาก จนกระทั่งปัจจุบันถึงแม้จะกล่าวได้ว่าเป็นยุคของเทคโนโลยีทางด้านไมโครอิเลคทรอนิกแล้วก็ตาม ทรานซิสเตอร์ก็มีบทบาทสำคัญอยู่มาก เพราะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องศึกษาและทำความรู้จักกับทรานซิสเตอร์ ทั้งทางด้านโครงสร้างรูปร่าง ตลอดจนถึงลักษณะสมบัติและการใช้งาน ในบทนี้จะได้กล่าวถึงความรู้ทั่งไปของตัวทรานซิสเตอร์ และการทำงานเบื้องต้น

ชนิดของทรานซิสเตอร์

การแบ่งทรานซิสเตอร์ออกเป็นชนิดย่อยๆ ย่อมแล้วแต่ผู้ที่แบ่งว่าจะแบ่งออกในรูปลักษณะอย่างไร เช่น ถ้าแบ่งในรูปของการใช้งานก็อาจแบ่งได้ เช่น สวิทชิ่งทรานซิสเตอร์ ทรานซิสเตอร์กำลัง ทรานซิสเตอร์ความถี่สูง ฯลฯ

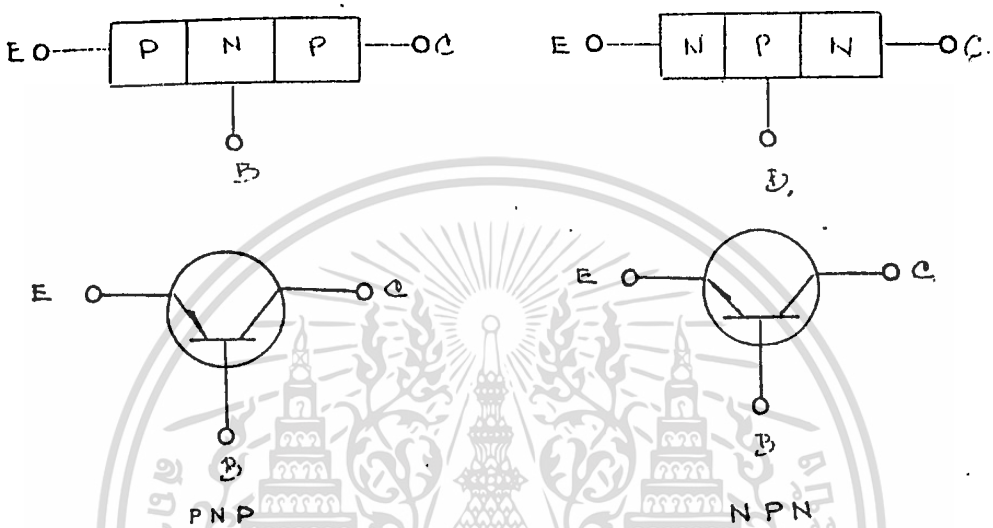
การแบ่งที่เป็นที่รู้จักกันดีอีกแบบหนึ่ง คือ แบ่งตามตัวโคางสร้างของตัวทรานซิสเตอร์ หรือจากเนื้อสารที่ใช้ทำตัวทรานซิสเตอร์ที่เรียกว่าสารกึ่งตัวนำ หรือเซมิคอนดัคเตอร์ ถ้าคุณสมบัติของเนื้อสารสามารถให้อิเลคตรอนไปถึงอะตอมหรือเนื้อสารอื่นได้ ก็เรียกเนื้อสารนั้นว่าเป็นชนิด N และทำนองกลับกันถ้าเนื้อสารสามารถรับอิเลคตรอนได้ ก็เรียกเนื้อสารนั้นว่าชนิด P สารกึ่งตัวนำที่ใช้กันมากเป็นพวกซิลิกอนและเยอรมันเนียม ซึ่งแร่ทั้งสองนี้สามารถนำมาทำให้เป็นสารกึ่งตัวนำได้ทั้งชนิด N และชนิด P

ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์อิเลคทรอนิกที่เกิดจากการเอาสารกึ่งตัวนำชนิด P และชนิด N มารวมกันโดยทำให้เกิดรอยต่อระหว่างเนื้อสารนี้สองรอยต่อ ถ้าตัวทรานซิสเตอร์ที่มีสารชนิด P อยู่สองหัวท้าย และชนิด N อยู่กลางก็เรียกว่า ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ในทำนองกลับกันถ้ามีสารชนิด P อยู่บริเวณกลาง และมีสารชนิด N อยู่หัวท้ายก็เรียกว่าชนิด NPN

รอยต่อจากเนื้อสารทั้ง 3 นี้ มีจุดต่อเป็นขาของทรานซิสเตอร์ เพื่อใช้เชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใยงหรือบัดกรีกับอุปกรณ์อื่น ดังนั้นทรานซิเตอร์จึงมี 3 ขา มีชื่อเรียกว่า คอลเลคเตอร์ (Collactor) ใช้สัญญลักษณ์ C อิมิตเตอร์ (emitter) ใช้สัญญลักษณ์ E และเบส (base) ใช้สัญญลักษณ์ B รูปร่างของโครงสร้างและสัญญลักษณ์ของตัวทรานซิสเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.



รูปที่ 2. สัญญลักษณ์และโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และชนิด PNP

การทำสารทั้งชนิด N และ P มารวมกันให้เกิดรอยต่อ ตลอดจนถึงการสกัดเนื้อสารเหล่านี้เป็นเทคนิคที่ยุ่งยากและเป็นอีกแขนงวิชาหนึ่ง ซึ่งในขั้นต้นนี้เรายังไม่จำเป็นต้องทราบรายละเอียดเกี่ยวกับขบวนการผลิตเหล่านี้ ดังนั้นการรู้จักกับทรานซิสเตอร์ในขั้นนี้เราจะรู้จักกับมันแต่เพียงคุณสมบัติและการใช้งานของตัวมันเท่านั้น

การที่จะบอกว่าทรานซิสเตอร์ตัวใดเป็น NPN หรือ PNP นั้น โดยทั่วไปผู้ผลิตจะบอกมาในหนังสือคู่มือ หรือข้อมูลของบริษัทผู้ผลิตอยู่แล้ว ในบางครั้งผู้ผลิตอาจสร้างสัญญลักษณ์ที่เป็นที่รู้จักกันอย่างง่ายๆ เป็นตัวบ่งบอกว่าทรานซิสเตอร์เบอร์ใดเป็นชนิด NPN หรือชนิด PNP เช่น ทรานซิสเตอร์ของบริษัทผู้ผลิตญี่ปุ่น จะกำหนดเบอร์ของทรานซิสเตอร์เป็นกลุ่มตัวเลขของตัวอักษรเหล่านี้คือ 2SA, 2SB, 2SC, 2SD สัญญลักษณ์ที่เป็นตัวอักษรคือ SA, SB,SC,SD จะเป็นตัวบอกว่าทรานซิสเตอร์นั้นเป็น

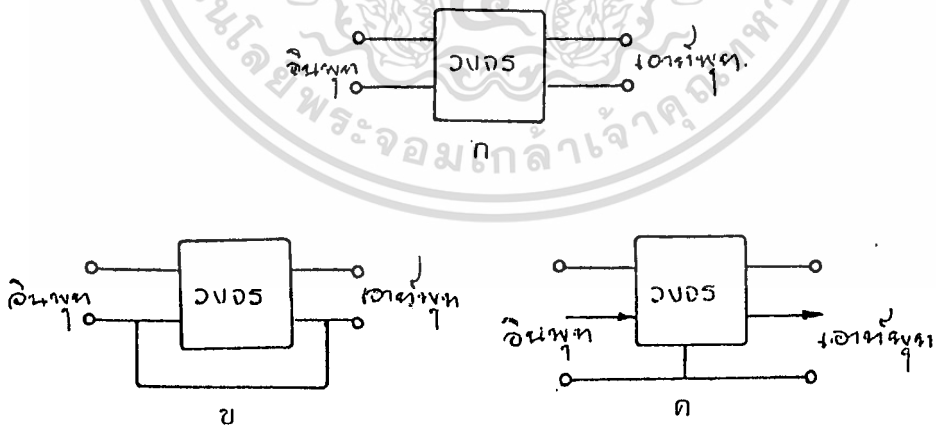
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไบแอสตรง ก็คือการที่เราต่อขั้วแบตเตอร์รี่ให้ตรงกับชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ราน้นๆ เช่นการต่อขั้วบวกของแบตเตอร์รี่เข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิด P และต่อขั้วลบของแบตเตอร์รี่เข้าที่สารชนิด N ลักษณะการต่อแบบนี้ ทำให้มีกระแสไหลผ่านสารกึ่งตัวนำได้มาก

ส่วนการไบแอสกลับ จะมีทิศทางการต่อขั้วแบตเตอร์รี่ต่างกับไบแอสตรง กล่าวคือต่อขั้วของแบตเตอร์รี่ให้ต่างกับชนิดของสารกึ่งตัวนำ โดยต่อขั้วลบเข้ากับสารชนิด P และต่อขั้วบวกเข้ากับสารชนิด N วิธีการไบแอสแบบนี้ตามอุดมคติไม่ควรมีกระแสไหลในวงจร แต่ในทางปฏิบัติมีกระแสรั่วไหลไปบ้าง

ในวงจรอิเลคทรอนิก เรามักเขียนระบบวงจรได้ง่ายๆ เป็นกล่องๆ หนึ่งมีขั้วต่อ 4 ขั้ว 2 ขั้วจะเป็นทางให้สัญญาณเข้า ดังนั้นสองขั้วแรกจึงเรียกว่า อินพุท (Input) หรือขั้วเข้า ส่วนสองขั้วที่เหลือเป็นทางให้สัญญาณที่ได้จากวงจรออกไปเราเรียกว่า เอาท์พุท (Output) หรือขั้วออก

ลักษณะของกล่องจะเป็นดังรูปที่ 4 และบ่อยๆ ครั้งอีกเช่นกันที่เรามักจะให้สัญญาณเข้าและสัญญาณออก มีสายร่วมกันหนึ่งสาย. สายนี้มีชื่อเรียกว่า สายร่วม (Common ถ้าสายร่วมต่อลงดิน (Earth) หรือลงแท่นเครื่อง (Chassis) ก็มักจะเรียกรวมกันไปว่า สายกราวนด์ (Ground) ยกเว้นแต่จะบ่งเฉพาะกันลงไป

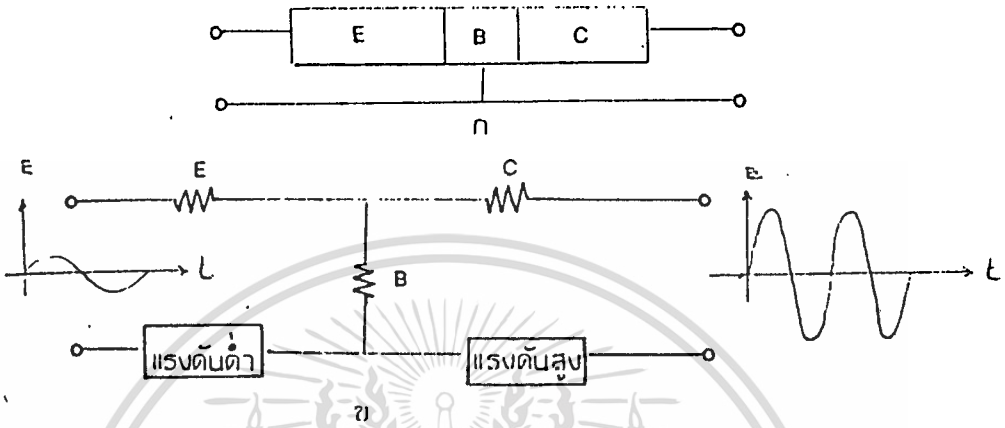


รูปที่ 4. การแทนวงจรด้วยกล่องที่มีอินพุท และเอาท์พุท

โดยหลักการเบื้องต้น ทรานซิสเตอร์สามารถขยายสัญญาณได้เช่นเดียวกับหลอดสูญญากาศเมื่อ ต่อตัวทรานซิสเตอร์เป็นรูปกล่อง แสดงอินพุทและเอาส์พุท ดังรูปที่ 4 แล้วจะได้ดังรูปที่ 5.ก ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วยวงจรสมบูรณ์ ซึ่งประกอบด้วยวงจรอินพุทและวงจรเอาท์พุท ดังแสดงในรูปที่ 5.ข กระแสที่ไหลเข้าทางด้านวงจรอินพุทจะควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลของกระแสทางด้านเอาท์พุท นั่นคือ เมื่อป้อนสัญญาณเข้าทางอินพุท จะเป็นผลทำให้เกิดกระแสไหลทางด้านอินพุท และจะมีกระแสไหลทางด้านเอาส์พุทด้วย แต่เนื่องจากวงจรทางด้านอินพุทเป็นวงจรแรงดันต่ำ และวงจรทางด้านเอาส์พุทมีแรงดันสูงกว่า จึงมีการขยายแรงดันให้มีค่าสูงขึ้น

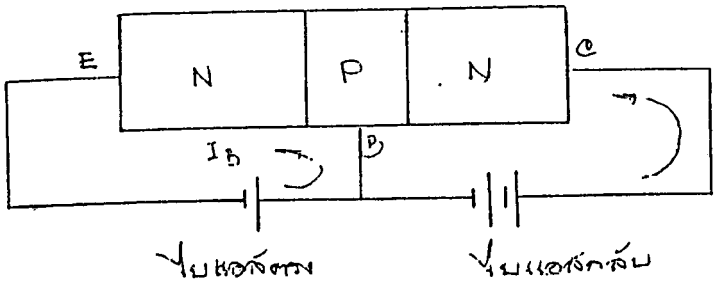


รูปที่ 5.การแทนตัวทรานซิสเตอร์ด้วยวงจรกล่อง

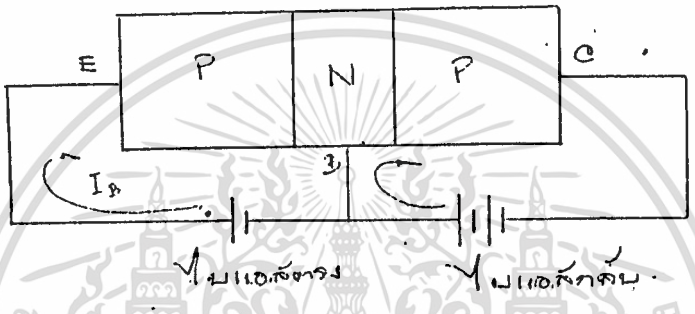
เมื่อเราจะเอาทรานซิสเตอร์มาใช้เป็นวงจรขยาย จึงต้องให้ไบแอสกับมัน และพยายามจัดวงจรให้มีลักษณะเหมือนดังรูปที่ 5.

เราจะมาเริ่มศึกษาวิธีการไบแอส จากรูปที่ 6.ตัวอย่างที่ใช้เป็นทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP จะเห็นว่าขาเบสและอิมิตเตอร์ได้รับการไบแอสตรง ขณะที่ขาเบสและคอลเลคเตอร์ได้รับไบแอสกลับ อาจจะสงสัยว่า ทำไมจึงต้องมีทั้งไบแอสตรงและไบแอสกลับ เหตุผลที่พอจะอธิบายกันง่ายๆ ก็คือ เราใช้ขาเบสและอิมิตเตอร์เป็นขั้วเข้า ในเมื่อต้องการให้กระแสในวงจรอินพุท (หรือวงจรเข้า) มีลักษณะการเพิ่มและลดตามสัญญาณเข้า ขั้วเข้าจะต้องได้รับการไบแอสตรง สำหรับขั้วออกจะใช้ขาคอลเลคเตอร์และขาเบส ในกรณีวงจรเอาท์พุท หรือวงจรออกเราต้องการให้กระแสเอาท์พุทถูกควบคุมด้วยกระแสอินพุท จึงต้องพยายามไม่ให้กระแสเอาท์พุทขึ้นกับแรงดันของวงจรเอาท์พุท นั่นคือ จัดการไบแอสให้เป็นไบแอสกลับ ทั้งนี้เพราะกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากแบตเตอร์รี่ในการไบแอสแบบนี้เป็นกระแสรั่วไหล ซึ่งมีค่าน้อยมากไม่ค่อยมีผลอะไรกับกระแสเอาท์พุทที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก

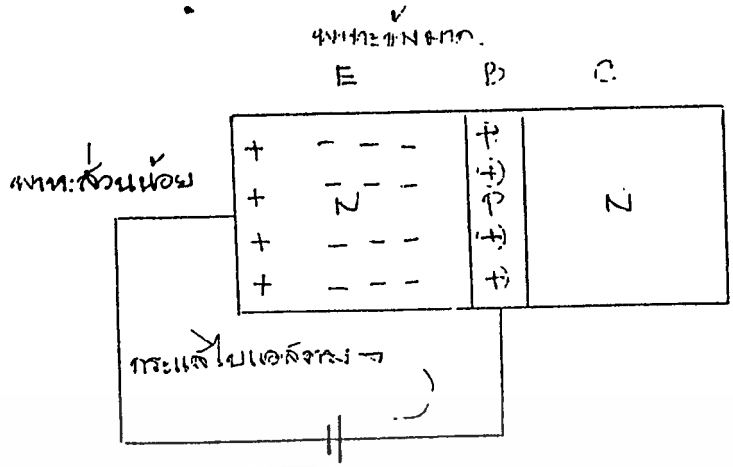


ข

รูปที่ 6.การจัดไบแอสให้กับทรานซิสเตอร์

มานึกดูว่ากระแสในวงจรจะมีขนาดและทิศทางการไหลเป็นอย่างไร ลองลำดับความคิดเป็นขั้นๆ กันอีกที โดยพิจารณาการทำงานของทรานซิสเตอร์ NPN โดยสมมุติว่าถ้าทรานซิสเตอร์ต่อเฉพาะวงจรอินพุทแต่เพียงอย่างเดียว เราจะเห็นว่าลักษณะเช่นนี้จะเป็นตัวไดโอดที่ต่อในลักษณะไบแอสตรง กระแสที่ไหลข้ามรอยต่อจึงเป็นกระแสของพาหะข้างมาก โดยการเกิดการรวมตัว (Recombination) ระหว่างโฮลและ - อิเลคตรอนที่ตรงบริเวณรอยต่อ แต่อย่างไรก็ดีทรานซิสเตอร์ยังมีส่วนแตกต่างจากไดโอดในเรื่องของการผสมสารเจือปน หรือโด๊ป (Dope) ที่ทำให้พาหะข้างมากในแต่ละส่วนมีค่าแตกต่างกัน และปริมาณเนื้อสารทั้งด้าน P และ N ก็มีค่าต่างกันด้วย กล่าวคือส่วนของเบสของทรานซิสเตอร์จะมีขนาดเล็กบางๆ และมีจำนวนพาหะข้างมาก จากการโด๊ปน้อยกว่าทางด้านอิมิตเตอร์ ดังนั้นจึงมีจำนวนอิเลคตรอนอิสระจากทางด้าน P ไหลเข้ามามากกว่า การเคลื่อนที่ของโฮลก็จึงไปรับอิเลคตรอนที่บริเวณรอยต่อ ดังนั้น จึงมีอิเลคตรอนอิสระเหลือจากการรวมตัว เกิดเป็นอิเลคตรอนอิสระในส่วนที่เหลืออยู่ที่เนื้อสารทางด้านเบส ดังนั้นกระแสที่ไหลครบวงจรจึงมีได้ไม่มากนัก ขึ้นอยู่กับจำนวนโฮลทางด้าน P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 การทำงานทางด้านวงจรอินพุทของตัวทรานซิสเตอร์

ครั้นเมื่อต่อวงจรเฉพาะด้านเอาท์พุทแต่เพียงอย่างเดียว โดยการต่อไบแอสกลับระหว่างขั้ว เบสกับคอลเลคเตอร์ จึงเหมือนกับการไบแอสกลับไดโอดธรรมดา กระแสที่เกิดขึ้นจึงเป็นกระแสรั่วไหลที่เกิดจากพาหะข้างน้อยที่มารวมตัวกันที่รอยต่อ ในทรานซิสเตอร์ NPN จะมีพาหะข้างน้อยทางด้านคอลเลคเตอร์ในรูปของโฮล ส่วนในทรานซิสเตอร์ PNP จะมีพาหะข้างน้อยทางด้านคอลเลคเตอร์ในรูปของอิเลคตรอนอิสระ

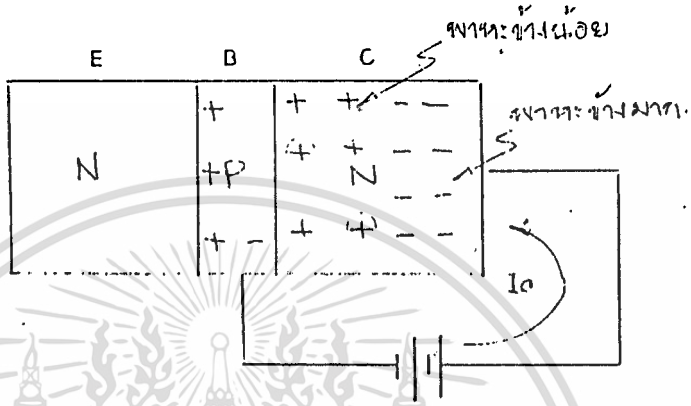
ส่วนของคอลเลคเตอร์จะต้องได้รับการโด๊ป ให้จำนวนพาหะข้างน้อยมีค่ามากพอที่จะก่อให้เกิดกระแสไบแอสกลับได้ ส่วนในการไบแอสกลับที่รอยต่อระหว่างอิมิดเตอร์และเบส จะต้องมีการไหลของกระแสไบแอสกลับได้น้อย ดังนั้นในขณะที่ยังไม่ได้ต่อวงจรทางด้านอินพุท กระแสไบแอสกลับทางด้าน เอาท์พุทควรจะมีค่าน้อย

ครั้นเมื่อทำการต่อไบแอสทั้งสองแบบพร้อมๆ กัน ดังรูปที่ 9. อะไรจะเกิดขึ้น ผลก็ควรจะใกล้เคียงกับรูปที่ 7.และ 8. คือกระแสเบสและอิมิตเตอร์เป็นกระแสไบแอสตรงควรจะมีค่ามาก ส่วนกระแสคอลเลคเตอร์เป็นกระแสไบแอสกลับ ควรจะมีค่าน้อย

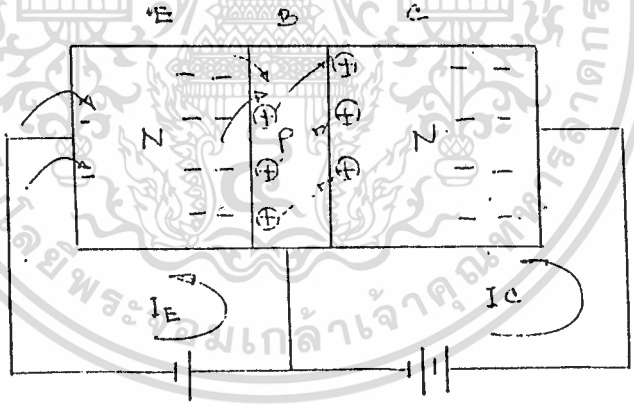
แต่เมื่อทดลองกันจริงๆ กลับไม่ได้ผลดังที่คาดเอาไว้ กล่าวคือ กระแสอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ มีค่าสูงและเกือบเท่ากัน ส่วนกระแสเบสมีค่าน้อยมาก ทำไมจึงเป็นเช่นนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหตุผลนี้สามารถอธิบายได้โดยอาศัยคุณสมบัติทางฟิสิกซ์ ของการเคลื่อนที่ของโฮล และอิเลคตรอนอิสระ ประการแรก เนื่องจากความกว้างของสารที่ใช้เป็นเบส มีค่าน้อย เมื่อเทียบกับอิมิดเตอร์และคอลเลคเตอร์ ประการที่สอง การเติมสารเจือปนลงในอิมิดเตอร์และคอลเลคเตอร์มีค่าไม่เท่ากัน อิมิดเตอร์จะถูกเติมสิ่งเจือปนที่เป็นพาหะข้างมากเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะเป็นผลทำให้พาหะข้างมากไหลข้ามไปเบสได้มาก (รูปที่ 8)



รูปที่ 8 การทำงานด้านเอาท์พุท



รูปที่ 9. การต่อทรานซิสเตอร์เพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำงาน

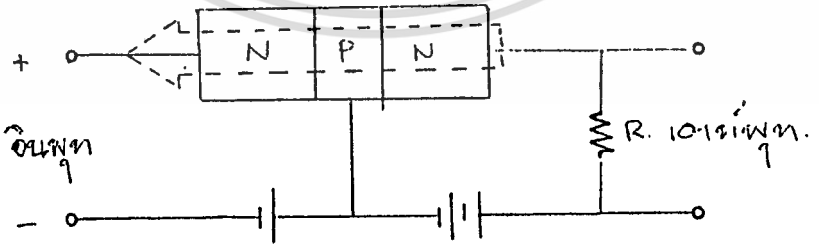
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเลคตรอนอิสระทางด้านอิมิตเตอร์จะข้ามมาด้านเบส แต่พาหะข้างมากของเบสมีจำนวนไม่มากนัก (รูปที่ 9.คือโฮล) ดังนั้นการรวมตัว (รีคอมไบเนชั่น) จึงเป็นไปได้น้อย ซะเดียวกันทางคอลเลคเตอร์ ถูกทำให้มีพาหะข้างน้อยเป็นจำนวนมาก ทำให้มีกระแสรั่วไหลที่มาจากเบสเป็นไปได้มาก ทั้งนี้เพราะที่เบสจะมีอิเลคตรอนเหลือจากการข้ามจากอิมิตเตอร์ จึงเกิดการรวมตัวพาหะข้างน้อยทางด้านคอลเลคเตอร์ได้ จึงเกิดการไหลของกระแสอิเลคตรอนจากอิมิตเตอร์ไปยังคอลเลคเตอร์ได้

โดยปกติแรงดันไบแอสตรงที่รอยต่ออิมิตเตอร์และเบสจะมีค่าน้อย มีค่าอยู่ราวๆ 0.2 โวลท์ ถึง 0.7 โวลท์ ส่วนแรงดันไบแอสกลับทางด้านเบสและคอลเลคเตอร์จะมีค่าสูง อาจจะสูงถึง 10 โวลท์ หรือมากกว่านั้น เมื่อแรงดันไบแอสกลับค่าสูงมาก กระแสรั่วไหลก็จะมีค่าสูงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยด้วย

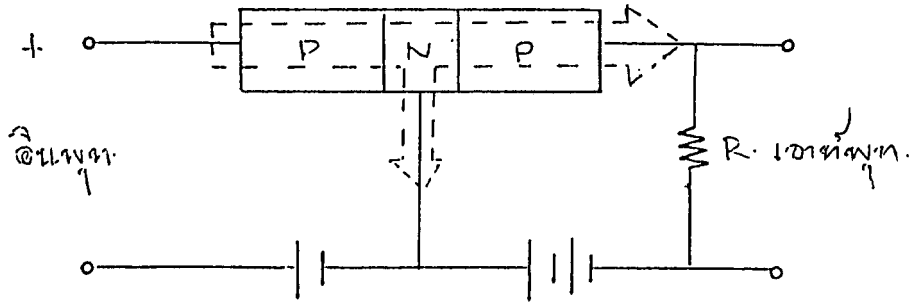
จากเหตุผลของการเคลื่อนที่ของอิเลคตรอนอิสระจากทางด้าน N ของขั้วคอลเลคเตอร์ ผ่านเบสไปยังคอลเลคเตอร์ เกิดการไหลของกระแสคอลเลคเตอร์ได้จำนวนมาก จึงเป็นเหตุผลที่เราไม่สามารถใช้ไดโอดธรรมดา 2 ตัว มาทำเป็นทรานซิสเตอร์ได้

สรุปทิศทางการไหลของกระแสต่างๆ สำหรับทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ดังตัวอย่างที่ยกมา จะเป็นดังรูปที่ 10. ส่วนทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ก็จะมีการทำงานเหมือนกับที่กล่าวมาแล้ว ผิดกันตรงที่ขั้วแบตเตอรี่และทิศทางการไหลของกระแส จะเป็นตรงกันข้ามเท่านั้นเอง ดังตัวแสดงในรูปที่ 11.



รูปที่ 10. แสดงทิศทางการไหลและปริมาณกระแสในทรานซิสเตอร์ชนิด NPN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11. แสดงทิศทางการไหลและปริมาณกระแสต่างๆ ในทรานซิสเตอร์ชนิด PNP

เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 10. และ 11. จะเห็นลักษณะเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ชนิด PNP และ NPN ได้อย่างดี สรุปได้ว่าในทรานซิสเตอร์ชนิด PNP กระแสอิมิตเตอร์ จะพุ่งเข้าหาตัวทรานซิส ตามทิศทางลูกศรของสัญญลักษณ์ที่ขา E แล้วแบ่งออกไปเป็น 2 ส่วน ส่วนใหญ่จะส่งออกไปทางขา C ส่วนน้อยจะพุ่งออกทางขา B สำหรับในทรานซิสเตอร์ชนิด NPN กระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์ที่พุ่งเข้าหาตัวทรานซิสเตอร์ จะมารวมกันที่อิมิตเตอร์กลายเป็นกระแสอิมิตเตอร์ แล้วพุ่งออกนอกตัวทรานซิสเตอร์ไปตามทิศทางลูกศรของสัญญลักษณ์

ไม่ว่าทิศทางการไหลของกระแสจะเป็นอย่างไรก็ตาม กระแสอิมิตเตอร์จะมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์เสมอ เขียนความหมายนี้ให้อยู่ในรูปสมการได้ว่า (1)

$$I_E = I_b + I_c$$

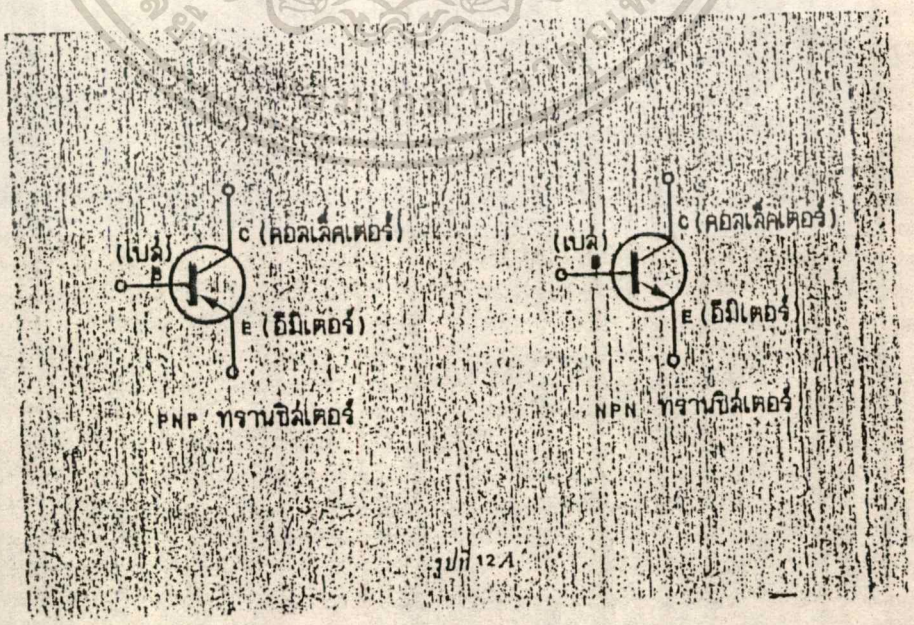
นั่นคือเมื่อเราทราบกระแส 2 ค่า เราก็จะหาค่ากระแสส่วนที่ 3 ได้จากสมการ ในที่นี้ขอให้เข้าใจก่อนว่า ทิศทางลูกศรที่ขาอิมิตเตอร์แสดงทิศทางการไหลของ "กระแสนิยม" (Conventional current) ไม่ใช่ทิศทางของ "กระแสอิเลคตรอน" (Electron current)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์ (TRANSISTER)

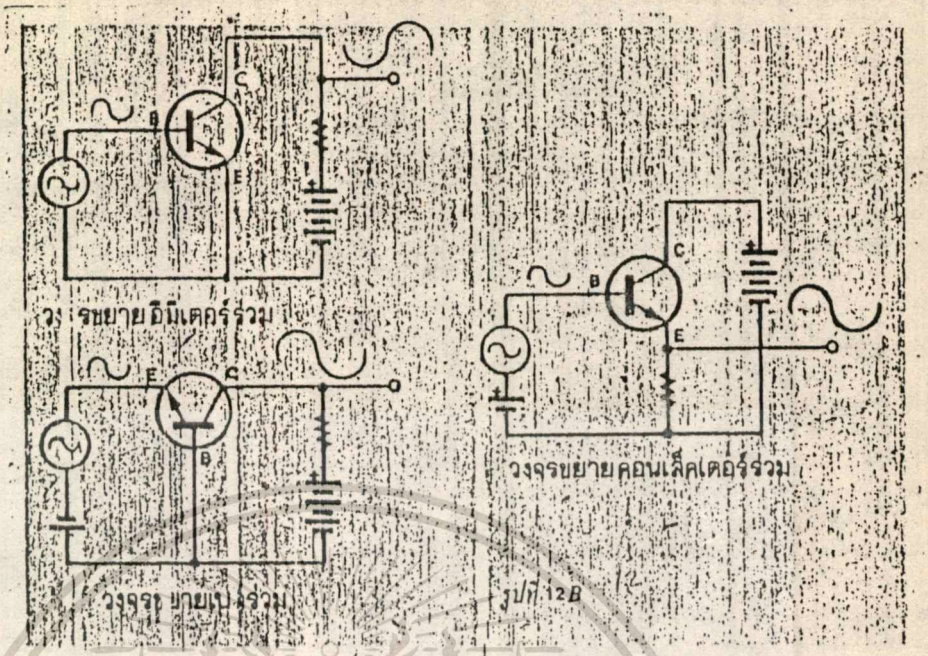
คือ อุปกรณ์ประเภทสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ที่มีโครงสร้างแตกต่างไปจากไดโอดคือ มีสามขั้ว ได้แก่ ขั้ว (ขา) อีมิตเตอร์, ขั้วเบส และขั้วคอลเล็คเตอร์ ทรานซิสเตอร์แบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ พีเอ็นพี (PNP) และ เอ็นพีเอ็น (NPN) ให้ดูรูปที่ 12A การใช้งานอาศัยการให้ไบอัสระหว่าง ขั้วเบสกับขั้วอีมิตเตอร์ฟอร์เวิร์ดไบอัส (forward bias) และเบสกับคอลเลคเตอร์ เป็นรีเวร์ด ไบอัส (reverse bias) จึงจะทำงานได้และให้คุณสมบัติในการขยายได้ถึง 3 ชนิด คือ วงจรขยานแบบเบสร่วม (common base) วงจรขยายอีมิตเตอร์ร่วม (common emitter) วงจรขยายคอลเลคเตอร์ร่วม (common collector) ให้ดูรูปวงจรขยายทั้ง 3 แบบ ในรูป 12B

เมื่อท่านผู้อ่านรู้จักตัวทรานซิสเตอร์ และคุณสมบัติโดยย่อแล้ว ก็จะขอเข้าสู่การแนะนำหรือเบิกตัวให้รู้จักหน้าค่าตา ตัวจริงของทรานซิสเตอร์ที่มีวางขายกันเกลื่อนตลาด ซึ่งมีไม่รู้กี่ร้อยกี่พันเบอร์ และเท่าที่สังเกตจะเห็นว่าผู้ขื้อส่วนมากจะบอกขื่อเบอร์ได้ถูกต้อง แต่น้อยคนที่จะรู้จักหรือเรียกขื่อรูปร่างของตัวมันได้อย่างถูกต้อง ไม่ใช่มาพูดเอาว่าตัวเหลี่ยมๆ กลมๆ แบนๆ สั้นๆ อะไรทำนองนี้

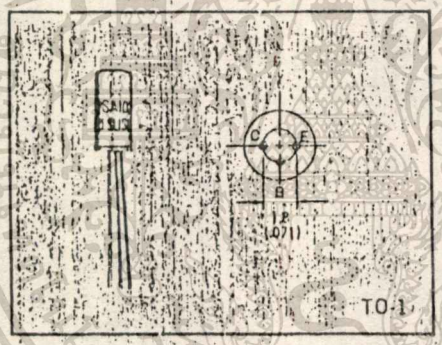


รูปที่ 12A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแบบของทรานซิสเตอร์

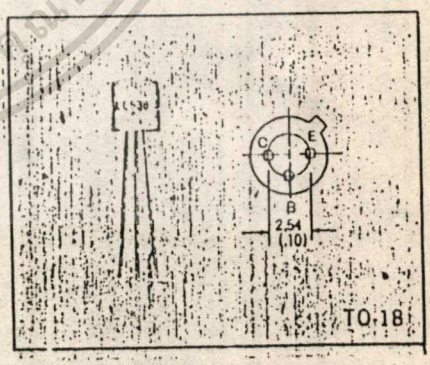


ตัวถังแบบ TO – 1

เป็นรูปทรงที่รู้จักกันดี สำหรับผู้เริ่มงานด้านอิเลคทรานิคส์ รูปร่างแบบนี้เป็นแบบที่เรียกว่า TO – 1 ตัวถังโลหะทรงกระบอก โดยทั่วไปจะเป็นเยอรมันเนียม ทรานซิสเตอร์

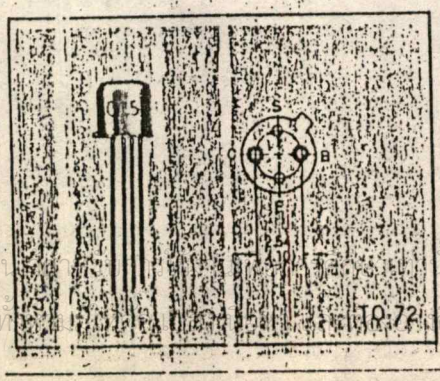
ตัวถังแบบ TO – 72

โดยทั่วไปส่วนมากเป็นซิลิกอลทรานซิสเตอร์ รูปแบบพบเห็นได้บ่อยมาก จะถูกนำมาใช้งานประเภท แอมปลิฟายน์ที่ความถี่สูง, เป็นสวิทช์ซึ่งความเร็วสูง และเป็นอุปกรณ์ความไวแสง มีขาใช้งาน 4 ขา ขาที่ 4 คือขาชีลด์ (S)

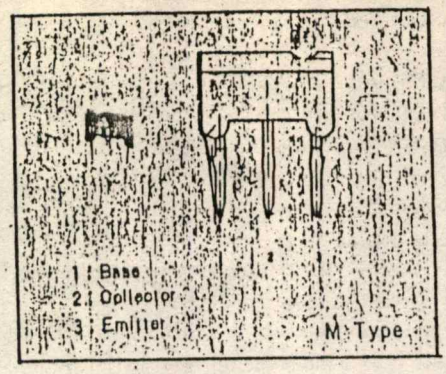


ตัวถังแบบ TO – 18

รูปร่างคล้ายคลึงกันแบบ TO – 72 แต่ดูเล็กกว่าและมีขา 3 ขาเป็นทรานซิสเตอร์แบบซิลิกอลเสียเป็นส่วนมาก และถูกนำมาใช้งานด้านแอมปลิฟายน์ สวิชชิ่ง ชลาปเปอร์ ขอบล่างจะมีโลหะยื่นออกระบุให้รู้ว่าขาอีอยู่ตรงไหน

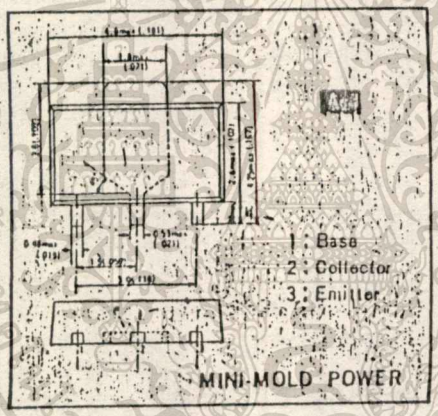


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



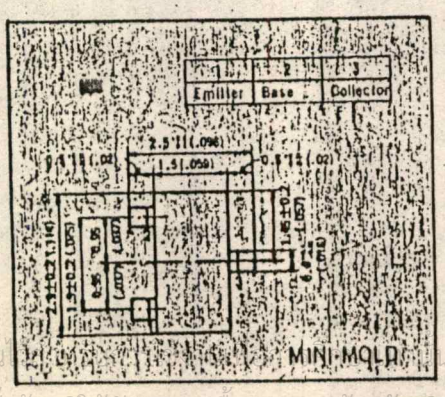
ตัวถังแบบ M

รูปร่างเหมือนตัวอักษรภาษาอังกฤษ ตัวเอ็ม ตัวถังแบบพลาสติก โดยทั่วไป เป็นซิลิกอนทรานซิสเตอร์ ถูกนำไปใช้ในย่านความถี่ออดิโอ เป็น AF AMP.



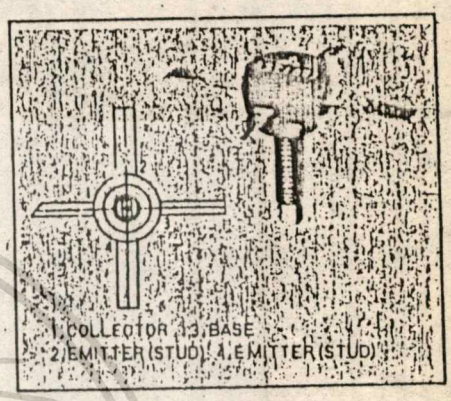
ตัวถังแบบ MINI-MOLD POWER

รูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก ขาใช้งานเรียงเป็นแถวอยู่ด้านล่าง ตัวถังเป็นพลาสติก เป็นซิลิกอนทรานซิสเตอร์ ใช้ในงานย่านออดิโอเป็น AF AMP.



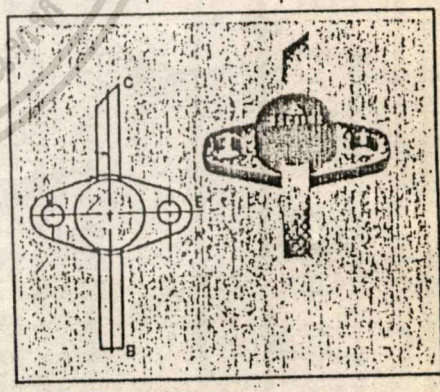
ตัวถังแบบ TO – 236 (MINI-MOLD)

มีขนาดเล็กจิ๋วมาก รูปทรงสี่เหลี่ยมด้านยาวมี 1 ขา ด้านล่าง 2 ขา เป็นทรานซิสเตอร์ประเภทซิลิกอล ใช้ในย่านออดิโอเช่นกันและให้สัญญาณรบกวนต่ำ (Low Noise)



ตัวถังแบบ TO – 128

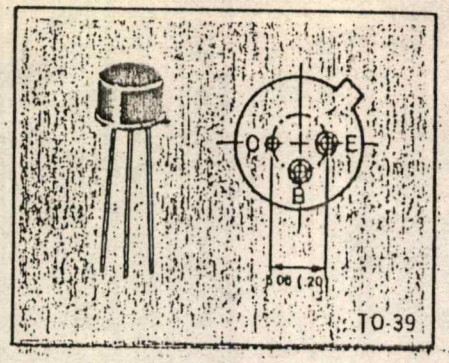
เป็นทรานซิสเตอร์ที่น้อยคนจะรู้จักหน้าค่าตาของมัน มีรูปทรงคล้าย ๆ กระดุมหรือใบพัดลมเครื่องบิน ทรานซิสเตอร์ชนิดนี้เป็นทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในงานขยายกำลังย่านความถี่ VHF และ UHF (งานสื่อสาร) เป็นซิลิกอลทรานซิสเตอร์



ตัวถังแบบ MD – 36

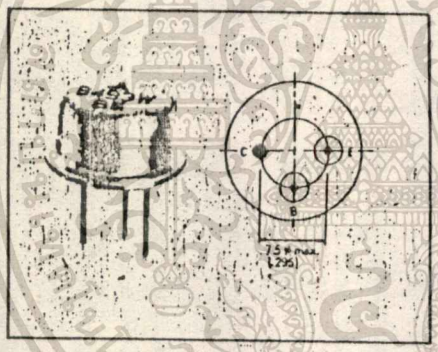
รูปร่างหน้าตาคล้ายทรานซิสเตอร์แบบ TO – 37 แต่มีปีก 2 ข้าง ยื่นออกมาคล้ายริบบิ้น ทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ใช้มากในงานสื่อสารย่าน VHF ตัวถังแสดงเป็นขาอีมิตเตอร์ แทนที่จะเป็นขาคอลเลคเตอร์เหมือนทั่ว ๆ ไป เป็นซิลิกอน เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



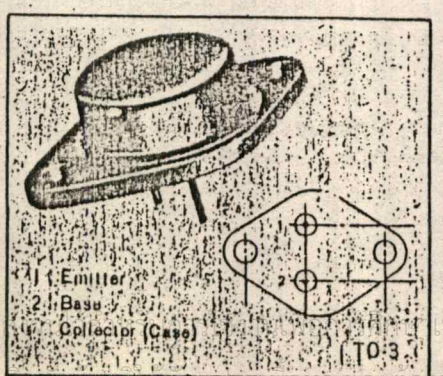
ตัวถังแบบ TO – 39

มีลักษณะทรงกลมเหมือน TO – 18 พบเห็นกันได้มากเป็นได้ทั้งเยอรมันเนียมและซิลิกอลทรานซิสเตอร์ ถูกนำมาใช้ในงานแอมปลิฟายน์ (สามารถขยายได้ในย่านความถี่สูง) และเป็นสวิชชิ่งได้



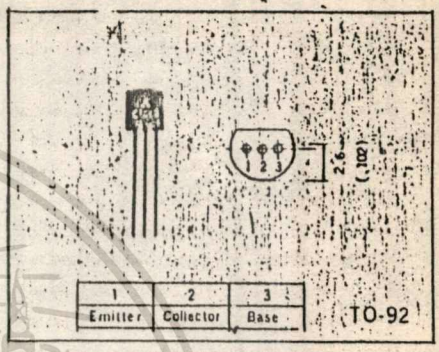
ตัวถังแบบ TO – 8

มีลักษณะทรงกลมคล้ายฐานเจดีย์ขอบล่างยื่นหมาออกมาหน่วย โดยทั่วไปเป็นเยอรมันเนียมทรานซิสเตอร์ใช้ทำงานด้านสวิชชิ่งและเพาเวอร์



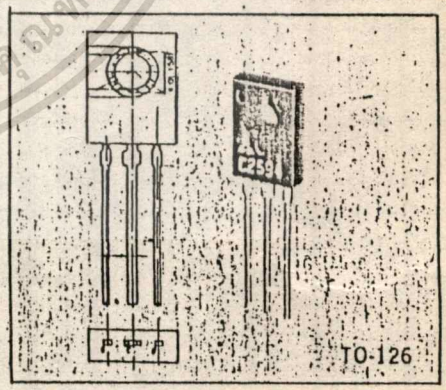
ตัวถังแบบ TO – 3

พบเห็นได้มากที่สุดในท้องตลาด บางคนเรียกว่าแบบหมวก ตัวถังจะเป็นขากอลเล็กเตอร์ มีทั้งเยอรมันเนียมและซิลิกอล ใช้ในงานเพาเวอร์แอมปลิฟายน์ และสวิชชิ่ง



ตัวถังแบบ TO – 92

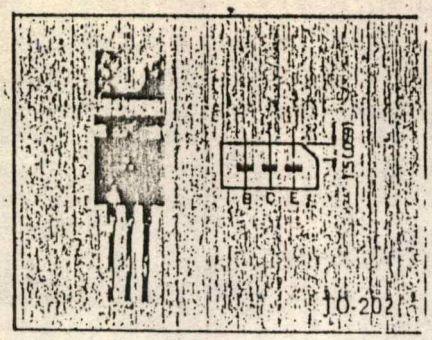
วัสดุห่อหุ้มเป็นพลาสติกทรงกระบอกสั้น ฝาซีกมีขนาดเล็กเป็นอีกชนิดหนึ่งที่พบเห็นได้มากที่สุด ส่วนมากเป็นซิลิกอลทรานซิสเตอร์ ถูกนำมาใช้ในงานสวิชชิ่งความเร็วสูงและแอมปลิฟายน์



ตัวถังแบบ TO – 126

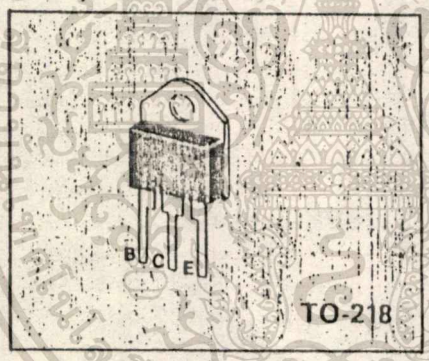
วัสดุห่อหุ้มเป็นพลาสติกทรงสี่เหลี่ยม ส่วนบนจะถูกเจาะเป็นร่องกลมมุมสี่เหลี่ยมสำหรับร้อยตัวน็อตเพื่อยึดทรานซิสเตอร์กับแผ่นระบายความร้อนส่วนมากเป็นซิลิกอลทรานซิสเตอร์ถูกใช้ในงานด้านสวิชชิ่งและเพาเวอร์แอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ [illegible] เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นการใช้เพื่อการอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



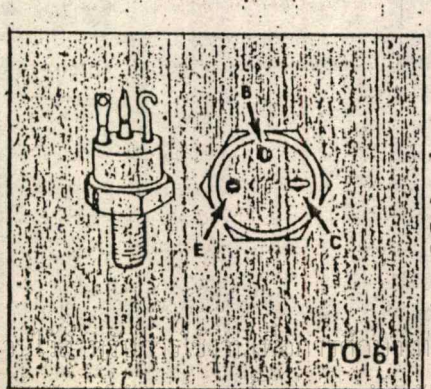
ตัวถังแบบ TO – 202

เป็นแบบที่คุ้นตากันพอสมควร สาร
กึ่งตัวนำภายในถูกห่อหุ้มด้วยพลาสติก
ด้านหลังมีแผ่นโลหะขนาดใหญ่แต่บา
เพื่อใช้เป็นตัวระบายความร้อนและเป็นตั
ยึดรวมทั้งเป็นขากอลเล็กเตอร์ด้วย โดย
ทั่วไปเป็นซิลิกอลทรานซิสเตอร์ใช้ในงา
เพาเวอร์สวิชชิ่ง



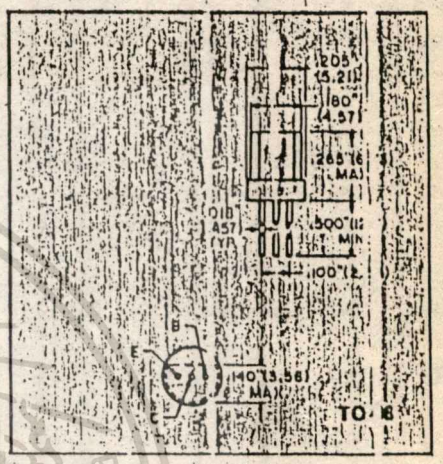
ตัวถังแบบ TO – 218

บางคนอาจพบเห็นและหยิบใช้งาน
อยู่บ่อย ๆ และอาจทราบดีว่าเป็นทราน-
วิสเตอร์แบบซิลิกอลที่ใช้ในงานด้านเป็น
ตัวเพาเวอร์ทั่ว ๆ ไป โครงสร้างภายใน
จะมีทรานซิสเตอร์ปรรจุถึง 2 ตัว



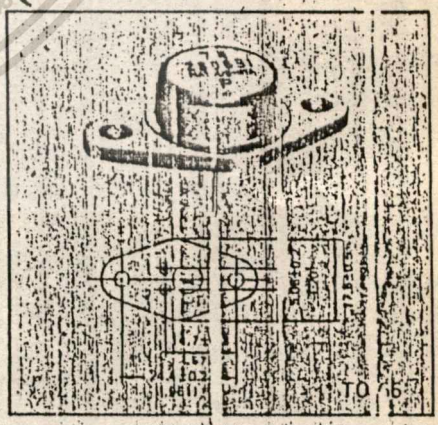
ตัวถังแบบ TO – 61

เป็นทรานซิสเตอร์ประเภทกำลังใช้
ในงานที่ต้องการกระแสสูงหลาย ๆ แอมป์
ทรานซิสเตอร์ที่มีลักษณะแบบนี้จึ ต้องมี
รูปร่างใหญ่และดูเ ขึ่งแร เทนทาน เพราะ
ต้องทนกระแสสูงมาก ๆ



ตัวถังแบบ TO – 98

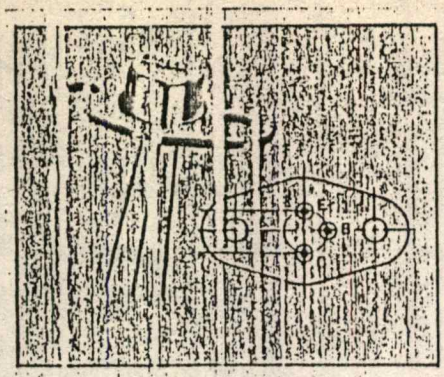
จะมีฐานเป็นทรงกลมและมีตัวถังเป็น
ทรงกระบอกฝาครึ่ง พอพูดแก้นได้มากโดย
ทั่วไปเป็นทรานซิสเตอร์แบบซิลิกอล ใช้
งานในด้านแอมปลิ ไฟน์ RF AMP.



ตัวถังแบบ TO – 66

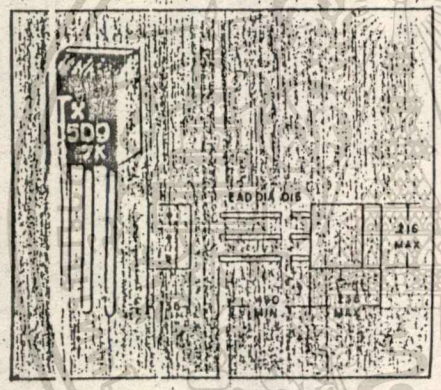
รูปทรงคล้ายกับ TO – 3 แต่ จะ
จะเล็กและยาวกว่า โดยทั่ว ไปเป็นซิลิ กอล
ทรานซิสเตอร์เป็นเพาเวอ แอมป์สวิชชิ่ง
และชอปเปอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การแสวงหากำไร
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



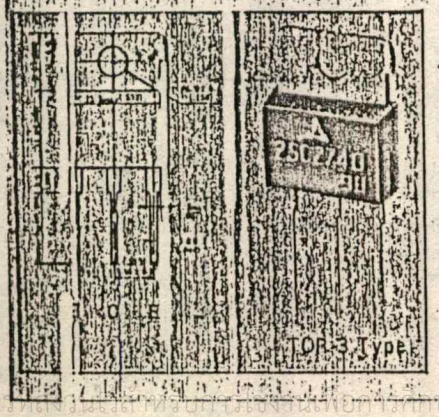
ตัวถังแบบ TO – 39 HS

ตัวถังคล้ายแบบ TO – 3 แต่มีขาเพิ่มขึ้นมาอีก 1 ขา รวมเป็น 3 ขา ส่วนตัวถังยังคงเป็นขาคอลเลคเตอร์เช่นเดิม เป็นซิลิกอล เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ใช้งานด้านอีเลคทรอนิคส์ทั่ว ๆ ไป



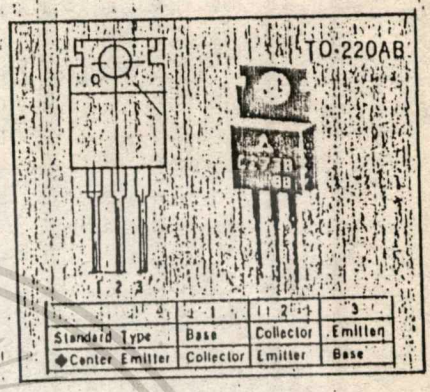
ตัวถังแบบ U – 83

ตัวถังเป็นวัสดุทรงสี่เหลี่ยมแบนสีดำ จะเป็นมุมเฉียงด้านบนมีให้เห็นได้มากในท้องตลาด เป็นทรานซิสเตอร์แบบซิลิกอล ใช้มากในงานแอมปลิฟายน์ ขยายสัญญาณที่ความถี่สูง ๆ ค่อนข้างดี



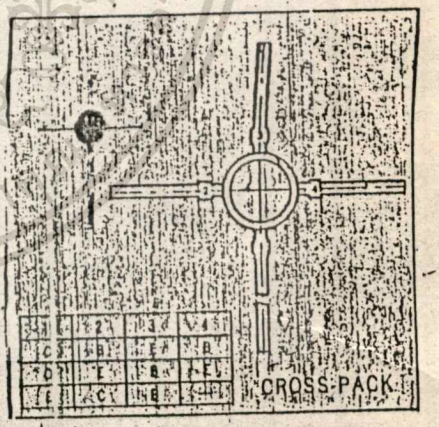
ตัวถังแบบ TOP – 3

วัสดุโอหุ้มทรงสี่เหลี่ยมป้อม หน้าด้านหลังมีแผ่นโลหะเป็นอลูมิเนียมหนาเช่นกันเพื่อยึดติดกับแผ่นระบายความร้อน และเป็นขาคอลเล็คเตอร์ด้วย เป็นซิลิกอน – ทรานซิสเตอร์



ตัวถังแบบ TO – 220 AB

มีรูปทรงคล้าย TOP – 3 แต่ขนาดเล็กกว่าแผ่นโลหะที่เป็นตัวช่วยระบายความร้อนและเป็นขาคอลเล็คเตอร์ตัดเหลี่ยมแตกต่างกัน โดยทั่วไปเป็นซิลิกอลทรานซิสเตอร์ และถูกใช้ในงานสวิชชิ่งและเพาเวอร์แอมป์



ตัวถังแบบ X – 137a (cross pack)

มีลักษณะกลมแบนขนาดเล็ก ตัวถังเป็นแบบพลาสติก มีขาใช้งาน 4 ขา มากกว่าทรานซิสเตอร์โดยทั่ว ๆ ไป เป็นทรานซิสเตอร์ที่ใช้งานย่านความถี่สูง (RF AMP., UHF AMP.) เป็นซิลิกอลทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบคุณ อาจารย์ ประภากร สุวรรณะ ที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ ให้หนังสืออ้างอิงในการค้นคว้า และอุปกรณ์รวมทั้งเครื่องมือกรทดลอง จนกระทั่งโครงงานนี้สำเร็จด้วยดี ตลอดจนเพื่อนๆทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการใช้คอมพิวเตอร์ ไว้ณ.โอกาสนี้ด้วย

ปุญญวัฒน์ พริ้งชะอุ่ม
ปรัชญา เสนทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

ก. เอกสารอ้างอิงภาษาไทย

1. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชัน ,"คู่มือ IC CMOS 4000 SERIES",1978.
2. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชัน ,"คู่มือ/เทียบเบอร์ ไอซี TTL",1978.
3. สานนท์ แก้วอบเชย ,วารสารเซมิคอนดักเตอร์อิเล็คทรอนนิคส์ ฉบับ 80-81,2530

ข. เอกสารอ้างอิงภาษาอังกฤษ

4. NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPERATION ,"LINEAR DATA BOOK" ,1982
5. WALTER G.JUNG ,"IC OP-AMP COOKBOOK",HOWARD W.SAMS & CO.INC. 1977.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้