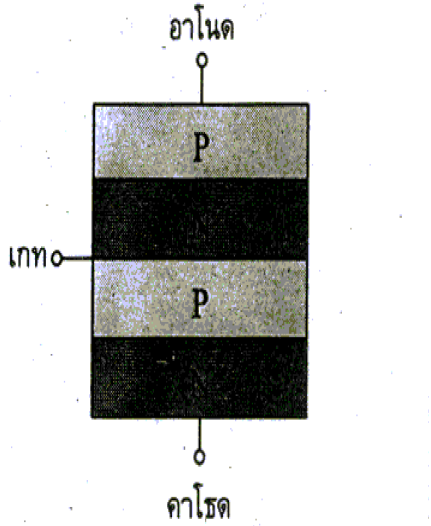
SCR

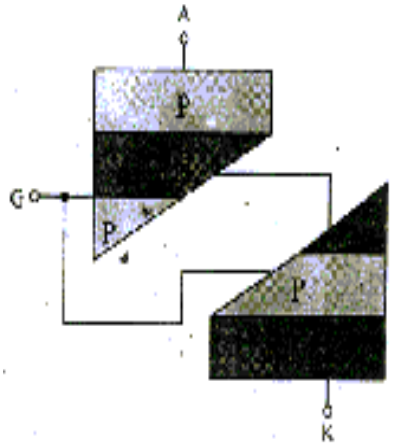
โครงสร้างและสัญลักษณ์ SCR

SCR เป็นอุปกรณ์ประเภทสารกึ่งตัวนำโดยมีโครงสร้างภายในประกอบด้วยชั้นของสารกึ่งตัวนำ 4 ชั้น ซึ่งได้รับการโดป (Dope) ในปริมาณที่แตกต่างกัน และมีขั้วต่อใช้งาน 3 ขั้ว ได่แก่ อาโนด (A) คาโธด (K) และเกท (G) ดังแสดงในรูป

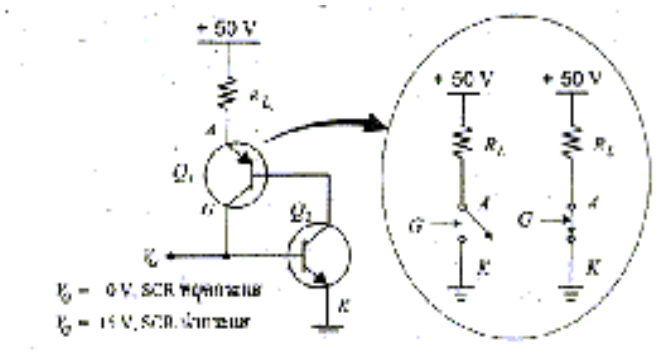


การทำงานของ SCR

เพื่อให้เข้าใจการทำงานของ SCR จากรูปแสดงการแบ่งสารกึ่งตัวนำทั้ง 4 ชั้นของ SCR โดยให้ พิจารณาเป็นทรานซิสเตอร์ 2 ตัว คือ ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP



รูปแสดงการต่อวงจรภายในซึ่งเป็นวงจรแบบ Complementary Latch ซึ่งการทำให้ SCR ทำงานเป็นสวิตซ์เปิดปิด นั้น จะต้องให้ไบอัสแก่ SCR ในลักษณะเช่นเดียวกับไดโอดโดยให้ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วอาโนดเป็นบวกเมื่อเทียบกับขั้วคาโธด และให้ขาเกทเป็นขาอินพุตที่ทำงานในสภาวะ HIGH นั้นเอง จะต้องได้รับการกระตุ้นโดยให้ศักย์ไฟฟ้าที่ขาเกทเป็นบวกเมื่อเทียบกับขั้วคาโธด

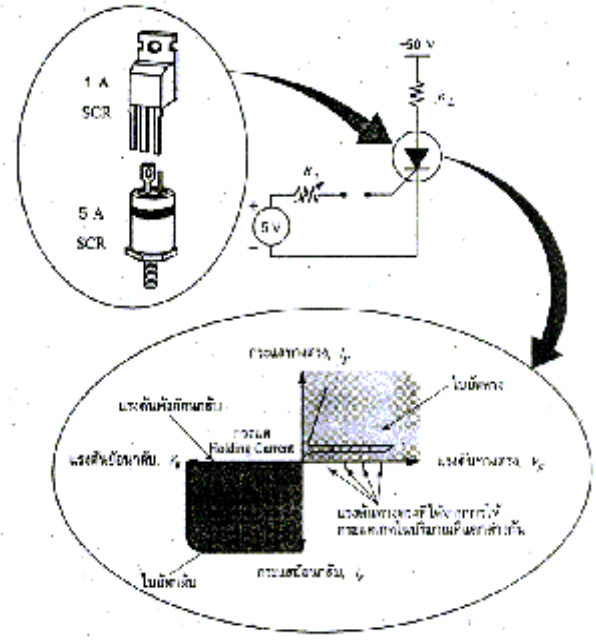


จากวงจรตัวอย่างในรูป จะเห็นว่า ขั้วอาโนดของ SCR ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟขนาด + 50 V โดยผ่านโหลด (RL) ส่วนขั้วคาโธดจะต่อลงกราวด์ (O V) สำหรับขาเกทซึ่งเป็นขาอินพุตจะได้รับสัญญาณควบคุมขนาด OV หรือ +5 V เมื่อขาเกทได้รับแรงดัน O V จะทำให้ Q1 และ Q2 อยู่ในสภาวะ OFF ในกรณีนี้ SCR จึงเสมือนเปิดสวิตซ์ ดังแสดงในภาพาขยายในรูปที่ 13-3 ในทางกลับกันถ้าขาเกทได้รับแรงดัน +5 V ก็จะทำให้ขอเบสของ Q2 มีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับขาอิมิตเตอร์ ดังนั้น Q2 จึงอยู่ในสภาวะ ON ของ Q2 นี้ จะทำให้แรงดัน OV จากขาอิมิตเตอร์ผ่านไปยัง Q1 ซึ่งจะทำให้ Q1 อยู่ในสภาวะ ON ด้วยการ ON ของ Q1 จะเป็นการเชื่อมแหล่งจ่ายแรงไฟที่มีความเป็นบวกสูงจากขาอิมิตเตอร์ผ่านมายังขาคอลเลคเตอร์และขาเบสของ Q2 ซึ่งจะทำให้ SCR คงสภาวะ ON อยู่ และทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วคาโธดผ่านไปยังขั้วอาโนดอย่างต่อเนื่องถึงแม้จะนำแหล่งจ่ายไฟ +5 V ที่ใช้กระตุ้นขาเกทในตอนแรกออกก็ตาม

คุณลักษณะของ SCR

รูปแสดงการให้ไบอัสที่ถูกต้องแก่ SCR สำหรับในรูปขยายด้านซ้ายมือ แสดงรูปลักษณะของ SCR ทั้งแบบ Low-power และแบบ High-Power ส่วนรูปขยายด้านขวามือเป็นกราฟแสดงคุณลักษณะทั่วไปของ SCR ซึ่งกราฟนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัสตรงและ

ไบอัสกลับที่จ่ายคร่อมระหว่างขั้วอาโนดกับขั้วคาโธดของ SCR และปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจากขั้วคาโธดไปยังขั้วอาโนด



พิจารณาในส่วนนำกระแสทางตรงบนกราฟจะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้ SCR อยู่ในสภาวะ ON เรียกว่า แรงดันพังทางตรง (Forward Breakdown Voltage) ซึ่งขนาดของแรงดันพังทางตรง หรือแรงดันที่ใช้ในการปิดวงจรของ SCR นี้ เป็นสัดส่วนผกผันกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าที่ขาเกท นั้นคือ SCR จะอยู่ในสภาวะ ON ได้ก็ต่อเมื่อมีกระแสไฟฟ้าที่มีปริมาณมากจ่ายเข้าที่ขาเกท แต่แรงดันทางตรงที่จ่ายคร่อมระหว่างขั้วอาโนดและคาโธดของ SCR จะต้องมีขนาดเล็ก แต่ถ้าไม่มีกระแสไฟฟ้าจ่ายเข้าที่ขาเกทเลยก็จะต้องให้แรงดันทางตรงค่ามาก ๆ จ่ายคร่อมระหว่างขั้วอาโนด และขั้วคาโธดของ SCR แทนจึงจะทำให้ SCR อยู่ในสภาวะ ON และเกิดการนำกระแสไฟฟ้าขึ้น และเมื่อ SCR อยู่ในสภาวะ ON แล้วแล้วกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน SCR จะเป็นอิสระจากการควบคุมของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าที่ขาเกท ซึ่งถ้ากระแสทางตรงที่ไหลผ่านระหว่างขั้ว คาโธด และอาโนดนี้มีค่าต่ำกว่าค่ากระแส Holding Current ก็จะทำให้ SCR อยู่ในสภาวะ OFF ทั้งนี้เนื่องจากว่า ทรานซิสเตอร์ทั้งชนิด NPN และ PNP จะไม่มีปริมาณกระแสไฟฟ้าเพียงพอที่จะรักษาสภาวะ ON ให้แก่ SCR ได้

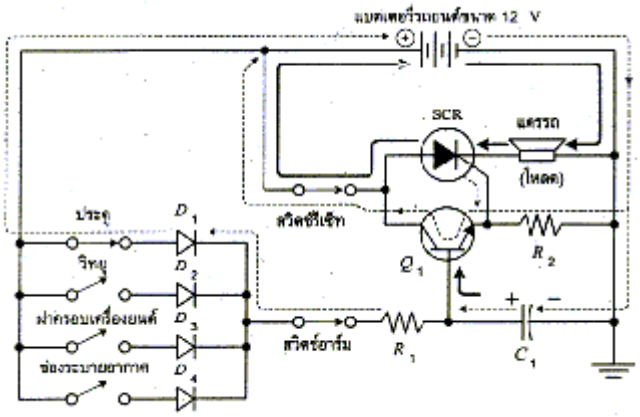
ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า การกระตุ้นที่ขาเกทจะทำให้ SCR อยู่ในสภาวะ ON และเมื่อต้องการให้ SCR อยู่ในสภาวะ OFF ก็ทำได้โดยลดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายคร่อมระหว่างขั้วอาโนด และขั้วคาโธดซึ่งจะมีผลทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจากขั้วคาโธดไปยังขั้วอาโนดลดลงต่ำกว่าค่ากระแส Holding Current

การนำ SCR ไปใช้งาน

SCR ถูกนำไปใช้มากในงานจำพวกไฟฟ้ากำลัง เช่น วงจรควบคุมความสว่าง วงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์ วงจรควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ ระบบควบคุมอุณหภูมิ และวงจรรักษาระดับกำลัง เป็นต้น จากกราฟแสดงคุณลักษณะของ SCR ในรูป จะเห็นว่า SCR นำกระแสในทิศทางตรงเท่านั้น (Forward Direction) ด้วยเหตุผลนี้จึงจัดให้ SCR เป็นอุปกรณ์จำพวก นำกระแสในทิศทางเดียว (Unidirectional Device) ซึ่งหมายความว่า ถ้าป้อนสัญญาณไฟฟ้า กระแสสลับผ่าน SCR ขาเกทของ SCR จะตอบสนองสัญญาณ และกระตุ้นให้ SCR ทำงานเฉพาะครึ่งบวกของสัญญาณที่จะทำให้อาโนดเป็นบวกเมื่อเทียบกับคาโธดเท่านั้น

ตัวอย่างในรูป แสดงการนำ SCR ไปใช้วงจรควบคุมความสว่าง โดยเมื่อสวิตซ์ ON/OFF เปิดวงจร และเนื่องจากไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลไปยังขาเกทจึงทำให้ SCR อยู่ในสภาวะ OFF หลอดไฟจึงยังไม่สว่าง แต่เมื่อสวิตซ์ ON/OFF ปิดวงจรจะทำให้ไดโอด D1 ผ่านส่วนที่เป็นแรงดันไฟฟ้าบวกไปยังขาเกทของ SCR ทุกครั้งที่สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับอยู่ในช่วงครึ่งบวก ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน SCR จะถูกควบคุมโดยตัวต้านทานควบคุมความสว่าง (R1) พิจารณารูปคลื่นสัญญาณที่ขยายให้เห็นในรูปที่ 13-5 จะเห็นว่าเมื่อค่าวความต้านทานของ R1 เท่ากับ 0 (ไม่มีการลดความสว่าง) จะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลไปยังขาเกทมีปริมาณสูงสุด ดังนั้น SCR จึงอยู่ในสภาวะ ON แบบเต็มครึ่งบวกของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายเข้ามา และกำลังงานเฉลี่ยที่ส่งไปยังหลอดไฟจะมีค่าสูง แต่ถ้าค่าความต้านทานของ R1 เพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ขาเกทของ SCR อยู่ในสภาวะ ON ไม่เต็มครึ่งส่วนของสัญญาณที่เป็นบวก ดังนั้น กำลังงานเฉลี่ยที่ส่งไปให้หลอดไฟจึงมีค่าลดลงจากตัวอย่างที่อธิบายไปแล้วเป็นการใช้งาน SCR ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ต่อไปจะพิจารณาการใช้งาน SCR ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง (DC) รูปแสดงระบบสัญญาณเตือนภัยในรถยนต์ เมื่อปิดสวิตซ์อาร์มและสวิตซ์รีเซ็ท ระบบสัญญาณเตือนภัยจะคอยรับสัญญาณจากสวิตซ์ตรวจจับทั้ง 4 ส่วนได้แก่ บริเวณประตู ระบบเครื่องเสียง ฝาปิดเครื่องยนต์ และฝาประโปรงหลัง จากนั้นจึงส่งสัญญาณไปกระตุ้นการทำงาน

ของอุปกรณ์เตือนภัยให้ทำงาน ตัวอย่างในรูปแสดงวงจรการทำงานของระบบเตือนภัยเมื่อเปิดประตูรถยนต์



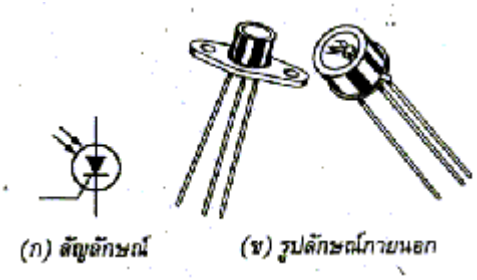
การเปิดประตูรถยนต์จะทำให้ตัวเก็บประจุ C1 ได้รับการชาร์จประจุผ่านทางไดโอด D และตัวต้านทาน R1 หลังจากช่วงเวลาหนึ่งผ่านไปจะทำให้ประจุไฟฟ้าที่ชาร์จเข้าไปใน C1 มีปริมาณเพียงพอที่จะทำให้ Q1 ทำงาน (ON) และเมื่อ Q1 ทำงาน ก็จะผ่านศักย์ไฟฟ้าบวกที่ขั้วคอลเลคเตอร์ซึ่งมาจากแบตเตอรี่ไปยังขั้วอิมิตเตอร์ และผ่านต่อไปยังขาเกทของ SCR เมื่อขาเกทได้รับการกระตุ้นจากศักย์ไฟฟ้าบวกก็จะทำให้ SCR ปิดวงจร (ON) และกระตุ้นอุปกรณ์เตือนภัยให้ทำงาน

เนื่องจาก SCR เสมือนกับปิดสวิตซ์เมื่ออยู่ในสภาวะ ON ซึ่งจะผ่านแรงดันไฟฟ้าขนาด 12 V จากแบตเตอรี่ไปยังอุปกรณ์เตือนภัย ซึ่งสภาวะ ON ของ SCR นี้ยังคงอยู่ต่อไปโดยไม่ขึ้นกับสวิตซ์อาร์มหรือสวิตซ์ตรวจจับอื่นใด และเมื่อทำการเปิดสวิตซ์รีเซ็ท ซึ่งซ่อนภายในรถก็ทำให้อุปกรณ์เตือนภัยหยุดทำงาน ค่าของ R1 และ C1 ควรเลือกให้เหมาะสมเพื่อให้มีช่วงเวลาการหน่วงที่พอดีการที่ Q1 และ SCR จะถูกกระตุ้นให้ทำงาน ซึ่งการหน่วงเวลานี้ก็เพื่อให้เจ้าของ รถยนต์เข้าไปในรถ และปลดการทำงานของระบบเตือนภัยโดยการเปิดสวิตซ์อาร์มได้ทันเวลา

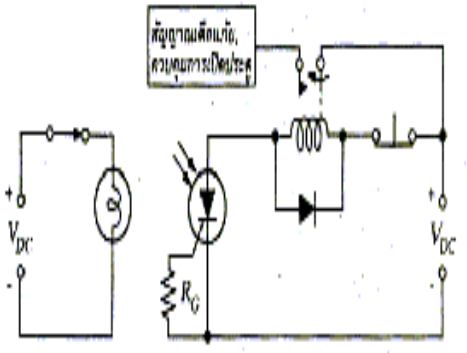
SCR ไวแสง

SCR ไวแสง (Light Activated Silicon Controlled Rectifier : LASCR) จะทำงานเป็นสวิตซ์ที่ทำงานด้วยแสงชนิดหนึ่ง โดยจะมีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับ SCR มาตรฐาน แต่มีความแตกต่างเพียงว่าการทำงานของ SCRไวแสงจะมีความไวแสงมาก ดังนั้น จึงสามารถใช้แสงที่มา

ตกกระทบเป็นตัวกระตุ้นให้ SCR ไวแสงทำงานได้ ส่วนใหญ่แล้ว SCR ไวแสงจะมีขาเกทต่อออกมาด้วยเช่นกัน ดังนั้น SCR ไวแสงจึงสามารถถูกกระตุ้นให้ทำงานนำกระแสได้ได้โดยใช้คลื่นสัญญาณไฟฟ้าได้เช่นเดียวกับ SCR มาตรฐานรูป แสดงสัญลักษณ์ และรูปลักษณะของ SCR ไวแสง



สำหรับการทำงานของ SCR ไวแสงนั้น จะมีความไวต่อแสงมากเมื่อจัดให้ขาเกทเปิดวงจรลอยไว้ แต่เพื่อเป็นการลดความไวในการตอบสนองต่อแสงก็สามารถทำได้ โดยต่อตัวต้านทานจากขาเกทเข้ากับขาคาโธด ตัวอย่างการใช้งานของ SCR ไวแสง เช่น วงจรควบคุมการเปิดประตู หรือวงจรสัญญาณเตือนภัย โดยจะใช้เป็นตัวกระตุ้นการทำงานของรีเลย์ ดังแสดงในรูป โดยการทำงานนั้นเมื่อการเปิดสวิตซ์ไฟ แสงจากหลอดไฟจะไปตกกระทบและกระตุ้นให้ SCR ไวแสงทำงาน ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านขั้วอาโนดเป็นตัวกระตุ้นให้รีเลย์ทำงานโดยการดึงหน้าสัมผัสให้ปิดลง ซึ่งจะทำให้การทำงานของระบบครบวงจร มีข้อสังเกตว่าข้อดีของการใช้ SCR ไวแสง



นั้นก็ คือ การกระตุ้นให้ระบบการทำงานจะไม่มีการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าใด ๆ กับวงจรของระบบเลย

ไตรแอก (TRIAC)

ไตรแอกเป็น อุปกรณ์จำพวกสารกึ่งตัวนำที่จัดอยู่ในสารกึ่งตัวนำประเภทไทริสเตอร์เช่นเดียวกับ SCR สามารถนำไปใช้กับแรงดันไฟสลับได้ และจำนำกระแสได้สองทิศทาง ทั้งช่วงบวกและช่วงลบของแรงดันไฟสลับ

รูปร่างของไตรแอกแบบต่าง ๆ

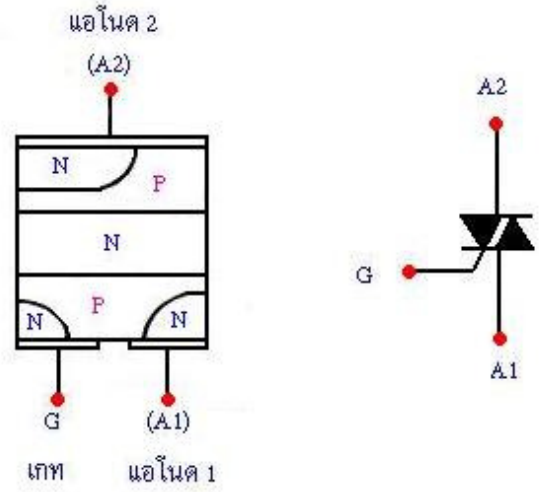
ไตรแอกทำงานเป็นสวิตซ์ต่อแรงดันไฟสลับ แต่จะเป็นสวิตซ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ดีกว่าสวิตซ์แบบกลไกทั่วไปหลายอย่างดัง นี้

1. ในการควบคุมการเปิด-ปิดวงจรไฟฟ้าด้วยไตรแอกทำได้ง่าย โดยป้อนแรงดันไฟสลับค่าต่ำ ๆ เพียงเล็กน้อยไปกระตุ้นขาเกท
2. การเปิด-ปิด ของไตรแอกจะเร็วกว่าสวิตซ์กลไกลธรรมดาหลายเท่า ทำให้การควบคุมให้สวิตซ์ทำงานทำได้รวดเร็วขึ้น
3. ในการเปิด -ปิดวงจรจะไม่มีการสัมผัสกันของหน้าสัมผัส เหมือนสวิตซ์กลไกลธรรมดา จึงไม่เกิดประกายไฟที่จะทำให้เกิดเพลิงไหม้มีความปลอดภัยในการใช้งานมากขึ้น
4. สามารถนำไปดัดแปลงในการใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากขึ้น

สัญลักษณ์และโครงสร้าง ของไตรแอก

โครงสร้างของไรแอกจะประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำตอนใหญ่ 3 ตอน คือ PNP และในสารกึ่งตัวนำตอนใหญ่จะมีสารกึ่งตัวนำตอนย่อยชนิด N อีก 3 ตอน ต่อร่วมในสารกึ่งตัวนำชนิด P ทั้ง 2 ตอน มีขาต่อออกมาใช้งาน 3 ขา เหมือน SCR โดยเรียกขาใช้งานต่าง ๆ ดังนี้ ขาแอโนด 2 (ANODE 2) ใช้ตัวย่อ A2 หรือเรียกอีกอย่างว่าขาเมน เทอร์มินอล 2 (MAIN TERMINAL 2) ใช้ตัวย่อ MT2 ขาแอโนด 1 (ANODE) ใช้ตัวย่อ A1 หรือเรียกอีกอย่างว่าขาเมน เทอร์มินอล 1

(MAIN TERMINAL 1) ใช้ตัวย่อ MT1 และขาเกท (GATE) ใช้ตัวย่อว่า G โครงสร้างและสัญลักษณ์ แสดงดังรูปที่ 3.2



(ก) โครสร้างไตรแอก **(ข) สัญลักษณ์ ไตรแอก**

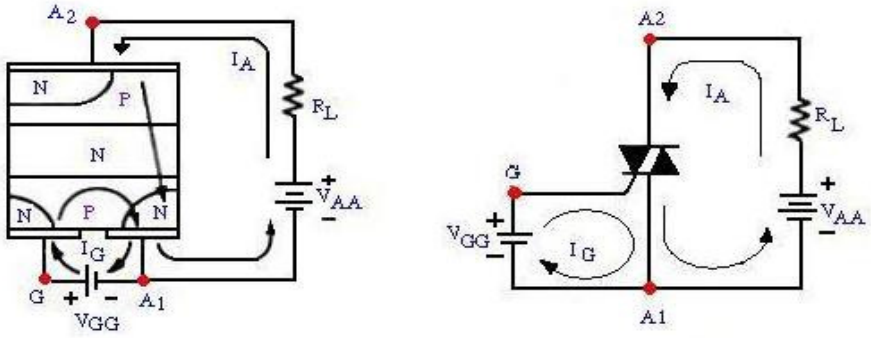
โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไตรแอก

คุณสมบัติในการทำงาน ของไตรแอกจะเหมือนกับการทำงาน ของ SCR ทุกประการ แต่ไตรแอกจะทำงานได้ดีกว่าที่สามารนำกระแสได้ทั้งแรงดันไฟสลับช่วงบวก และแรงดันไฟสลับช่วงลบพร้อมทั้งขา G ก็สามารถใช้แรงดันบวกหรือลบมากระตุ้นก็ได้

การจ่ายไบอัสให้ไตรแอกทำงาน

ไตรแอกมีคุณสมบัติทำงานได้ทั้งแรงดันช่วงลบและแรง ดันช่วงบวก คือ จะนำกระแสได้ทั้ง 2 ทิศทาง การนำกระแสของ ไตรแอกจะขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อนกระตุ้นขา G และแรงดันที่จ่ายให้ขา A2 และ A1 เมื่อจัดการจ่ายไบอัสให้ตัวไตรแอกสามารถที่จะจัดไบอัสเพื่อให้ตัวไตรแอกทำ งานได้ทั้งหมด 4 สภาวะดังนี้คือ

1. สภาวะที่ 1 หรือควอแดรนต์ที่ 1

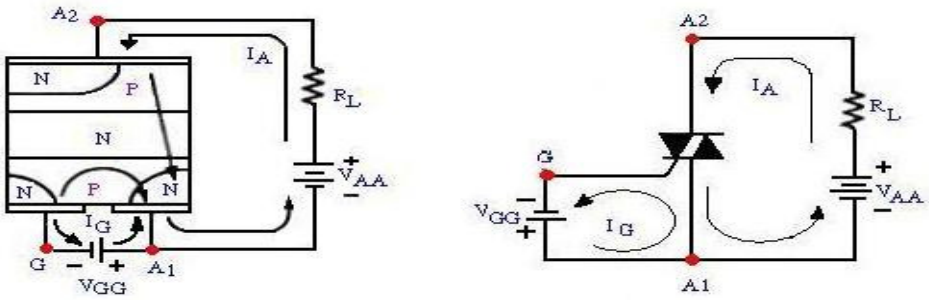


(ก) โครงสร้าง **(ข) สัญลักษณ์**

3.3 แสดงสภาวะการนำกระแสของไตรแอกในควอแดรนต์ที่1

จากรูปที่ 3.3 แสดงสภาวะการนำกระแสของไตรแอกในควอแดรนต์ที่ 1 โดยจ่ายแรงดันบวกให้ขา A2 จ่ายแรงดันลบให้ขา A1 และมีแรงดันบวกกระตุ้นขา G จะเป็นการจ่ายไบอัสเช่นเดียวกับ SCR ไตรแอกจะนำกระแสทิศทางการไหลของกระแสทั้งสองจะไหลในทิศทางเดียวกัน หรือกระแสไหลเสริมกัน ทำให้ IA ไหลมากขึ้น

2. สภาวะที่ 2 หรือควอแดรนต์ที่ 2

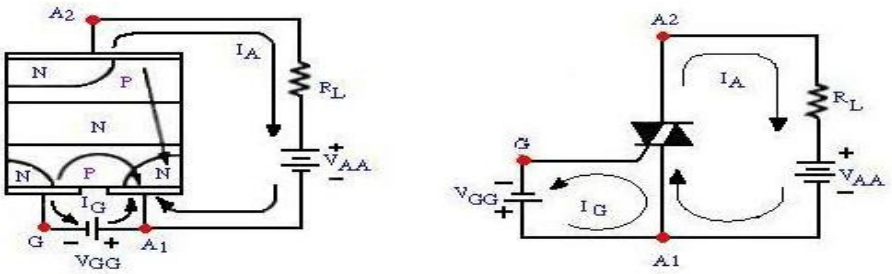


(ก) โครงสร้าง **(ข) สัญลักษณ์**

3.4 แสดงสภาวะการนำกระแสของไตรแอกในควอแดรนต์ ที่ 2

จากรูปที่ 3.4 จ่ายแรงดันบวกให้ขา A2 จ่ายแรงดันลบให้ขา A1 และมีแรงดันลบกระตุ้นขา G เป็นการจ่ายแรงดันกระตุ้นอีกแบบหนึ่งไตรแอกจะนำกระแสทิศทางการไหลของกระแสทั้งสองจะไหลในทิศทางสวนกัน หรือกระแสไหลหักล้างกัน ทำให้ IA ไหลน้อยลง

3. สภาวะที่ 3 หรือควอแดรนต์ที่ 3

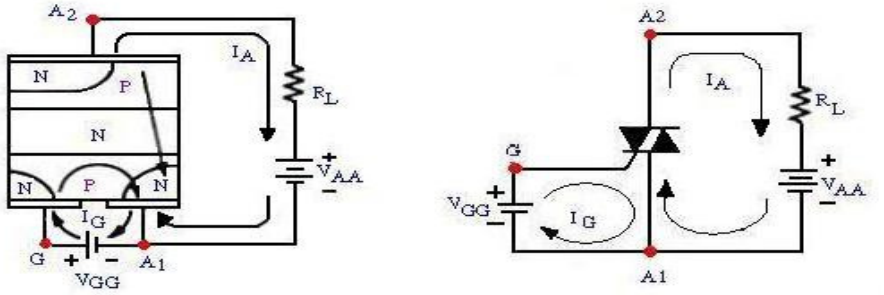


(ก) โครงสร้าง **(ข) สัญลักษณ์**

รูปที่ 3.5 แสดงสภาวะการนำกระแสของไตรแอกในควอแดรนต์ที่ 3

จากรูปที่ 3.5แสดงสภาวะการนำกระแสของไตรแอกในควอแดรนต์ที่ 3 โดยจ่ายแรงดันลบให้ขา A2 จ่ายแรงดันบวกให้ขา A1 และจ่ายแรงดันลบกระตุ้นขา G เป็นการจ่ายแรงดันกระตุ้นอีกแบบหนึ่ง ไตรแอกจะนำกระแสทิศทางการไหลของกระแสทั้งสองจะไหลในทิศทางเดียวกัน หรือกระแสไหลเสริมกัน ทำให้ IA ไหลมากขึ้น

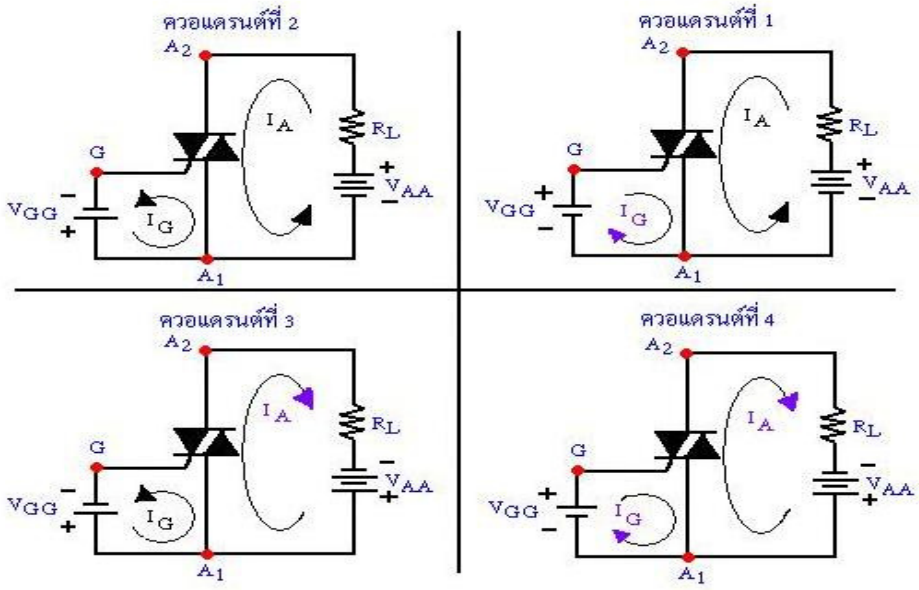
4. สภาวะที่ 4 หรือควอแดรนต์ที่ 4



(ก) โครงสร้าง **(ข) สัญลักษณ์**

รูปที่ 3.6 แสดงสภาวะการนำกระแสของไตรแอกในควอแดรนต์ที่ 4

การจ่ายแรงดันลบให้ ขา A2 จ่ายแรงดันบวกให้ขา A1 และจ่ายแรงดันบวกกระตุ้นขา G เป็นการจ่ายไบอัสอีกแบบหนึ่งไตรแอกจะนำกระแสทิศทางการไหลของกระแสทั้ง สองจะไหลในทิศทางเดียวกัน หรือกระแสไหลหักล้างกัน ทำให้ IA ไหลน้อยลง



รูปที่ 3.7 แสดงการทำงานของไตรแอกในแต่ละควอแดรนต์

การเลือกสภาวะการทำงานและการทำให้ไตรแอกหยุด นำกระแส
จากรูปที่ 3.7 แสดงการทำงานของไตรแอกทั้ง 4 ควอแดรนต์ สภาวะกระแสเสริมกัน คือ ควอแดรนต์ที่ 1 และควอแดรนต์ที่ 3 สภาวะกระแสหักล้างคือ ควอแดรนต์ที่ 2 และควอแดรนต์ที่ 4
ไตรแอกเมื่อนำกระแสแล้วจะทำให้หยุดนำกระแสทำได้ 2 วิธีด้วยกันเหมือน SCR คือ

1. ตัดแหล่งจ่ายแรงดัน VAA ที่ป้อนให้ขา A2 และขา A1ของไตรแอกออกชั่วคราว

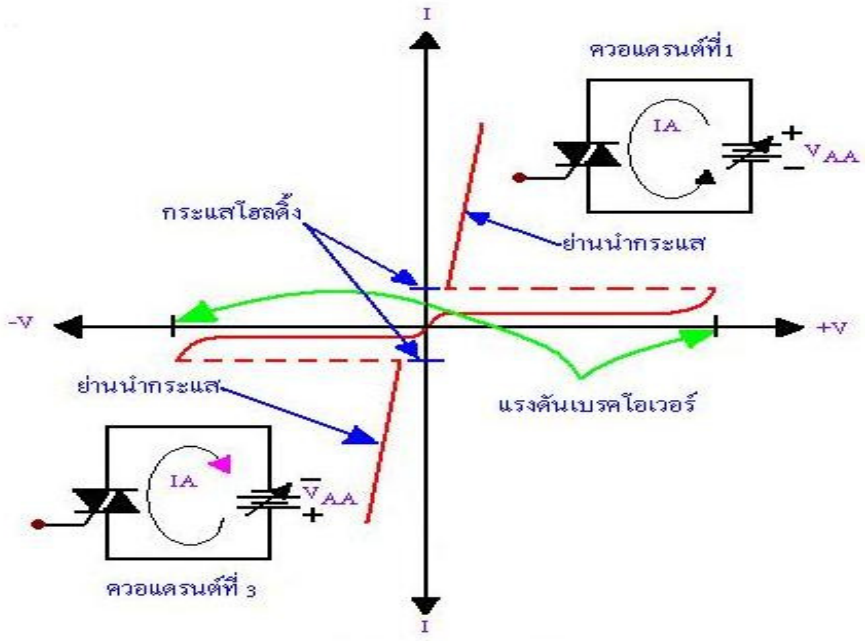
2.ลดแรงดันไบอัสที่จ่ายให้ขา A2 และขา A1 ลง จนทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวไตรแอกต่ำกว่ากระแสโฮลดิ้ง (HOLDING CURRENT) ของไตรแอกตัวนั้น ๆ

กร๊าฟคุณสมบัติของไตรแอก

การ นำกระแสของไตรแอก จะนำกระแสได้ 2 วิธี คือ โดยจ่ายแรงดันไบอัสให้เฉพาะขา A2 และขา A1 โดยขา G เปิดลอยอยู่ ไตรแอกจะนำกระแสเมื่อเพิ่มแรงดันให้ขา A2 และขา A1 จนมีกระแสไหลผ่านตัวไตรแอกถึงค่ากระแสโฮลดิ้ง อีกวิธีหนึ่งโดยจ่ายแรงดันให้ขา A2 และขา

A1 และมีแรงดันกระตุ้นขา G

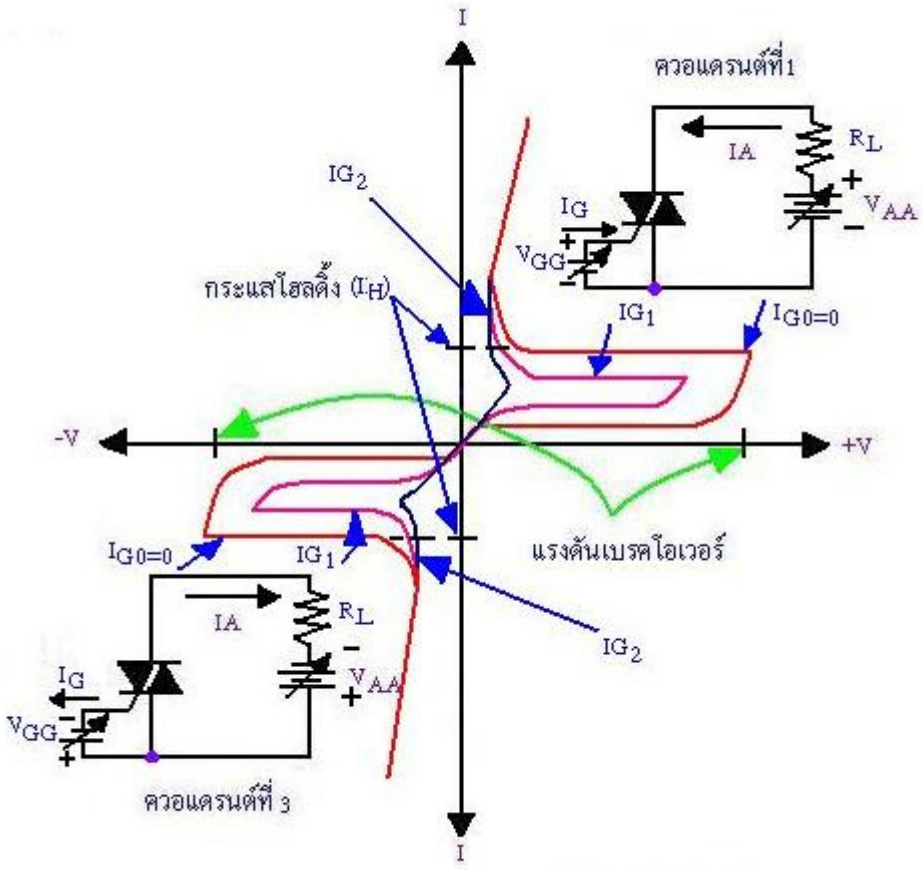
1. ไตรแอกนำกระแสโดยจ่ายแรงดันเฉพาะขา A2 และขา A1



รูปที่ 3.8 กร๊าฟคุณสมบัติของไตรแอกขณะที่ขาเกทเปิดลอยอยู่

การจ่ายแรงดันไบอัสให้ไตรแอก ไม่ว่าจะจ่ายบวกให้ A2 จ่ายลบให้ A1 หรือจ่ายลบให้ A2 จ่ายบวกให้ A1 ในครั้งแรกตัวไตรแอกจะไม่นำกระแส เมื่อค่อย ๆ ปรับจ่ายแรงดัน VAA ให้ตัวไตรแอกเพิ่มมากขึ้นทีละน้อย กระแสรั่วซึมจะไหลผ่านตัวไตรแอกเพิ่มขึ้นที่ละน้อยตามไปด้วย เมื่อจ่ายแรงดันถึงค่า ๆ หนึ่ง จะมีกระแสรั่วซึมไหลผ่านไตรแอกถึงค่ากระแสโฮลดิ้งของตัวไตรแอก ถ้าไม่สามารถจำกัดค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวไตรแอกได้ ไตรแอกจะชำรุดเสียหายทันที จะได้กร๊าฟคุณสมบัติของไตรแอกทั้งควอแดรนต์ที่ 1 และควอแดรนต์ที่ 3 เหมือนกัน การทำงานของไตรแอกในวิธีนี้จะไม่เป็นที่นิยมใช้

2. ไตรแอกนำกระแสโดยมีแรงดันกระตุ้นขา



รูปที่ 3.9 กร๊าฟคุณสมบัติของไตรแอกขณะที่จ่ายแรงดันกระตุ้นที่ขาเกท

จากกร๊าฟที่ 3.9 อธิบายได้ดังนี้

กร๊าฟในช่วงควอแดรนต์ที่ 1 จ่ายแรงดันไบอัสให้ขา A2 เป็นบวก ขา A1 เป็นลบ ถ้าในครั้งแรกยังไม่จ่ายแรงดันไบอัสกระตุ้นขา G (IGO=0) ไตรแอกจะนำกระแสเมื่อป้อนแรงดันให้ขา A2 และขา A1 ถึงค่าแรงดันเบรคโอเวอร์ (BREAKOVER VOLTAGE) ถ้าจ่ายแรงดันให้ขา A2 และขา A2 ต่ำกว่าแรงดันเบรคโอเวอร์ การนำกระแสของตัวไตแอกจะต้องอาศัยแรงดันกระตุ้นที่ขา G เป็นบวก ทำให้กระแสเกท IG1 หรือ IG2 ไหล จะมีกระแสไหลผ่านตัวไตรแอกถึงค่ากระแสโฮลดิ้ง ไตรแอกจะทำงานได้โดยไม่ชำรุดเสียหาย

กร๊าฟในช่วงควอแดรนต์ที่ 3 ถ้าให้แรงดันที่ขา A2 และขา A1 ต่ำกว่าค่าแรงดันเบรคโอเวอร์ การทำงานของไตรแอกจะต้องมีแรงดันลบกระตุ้นขา G มีกระแส IG1 หรือ IG2 ไหล ไตรแอกจะนำกระแสทันที

รายละเอียดและขีดจำกัด ของไตรแอก

1. แรงดันบล๊อกกิ้งสูงสุดซ้ำ ๆ (REPETITIVE PEAK BLOCKING VOLTAGE) ใช้ตัวย่าง VDRM หรือ VRRM คือ แรงดันค่าสูงสุดที่ป้อนให้เฉพาะขา A2 และขา A1 ที่ตัวไตรแอกยังไม่นำกระแส

2. กระแสไปอัสตรงสูงสุดเป็น RMS (RMS MAN FORWARD CURRENT) ใช้ตัวย่อ IT (RMS)คือค่ากระแสสูงสุดเป็นRMSที่ไตรแอกแทนได้เมื่อมีกระแส ไบอัสตรงไหลผ่าน ถ้ากระแสไหลผ่านไตรแอกเกินกว่าค่านี้ไตรแอกจะชำรุดเสียหาย

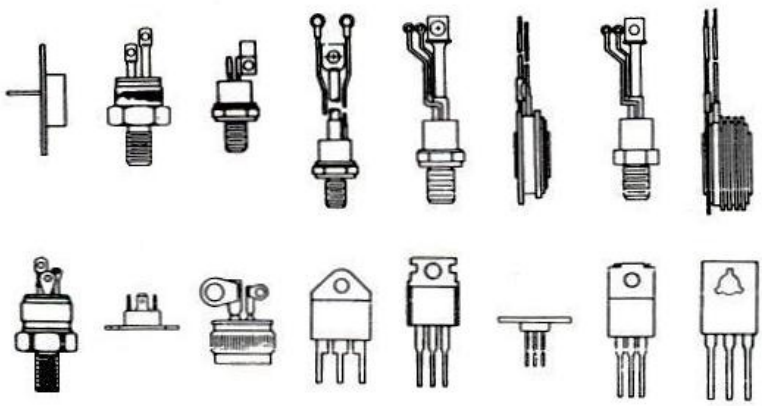
3.กระแสโฮลดิ้ง (HOLDING CURRENT) ใช้ตัวย่า IH คือค่ากระแสต่ำสุดที่ไหลผ่านตัว ไตรแอก ระหว่างขา A2 และขา A1 แล้วไตรแอกยังคงนำกระแสได้

4.กระแสกระตุ้นเกท (GATE TRIGGER CURRENT) ใช้ตัวย่อ IGT คือกระแสที่ใช้กระตุ้นขา G ของไตรแอก เพื่อทำให้ไตรแอกทำงาน

5.แรงดันกระตุ้นเกท (GATE TRIGGER VOLTAGE) ใช้ตัวย่อ VGT คือแรงดันที่ป้อนให้ขา G เทียบกับขา A1 เพื่อกระตุ้นให้ไตรแอกนำกระแส

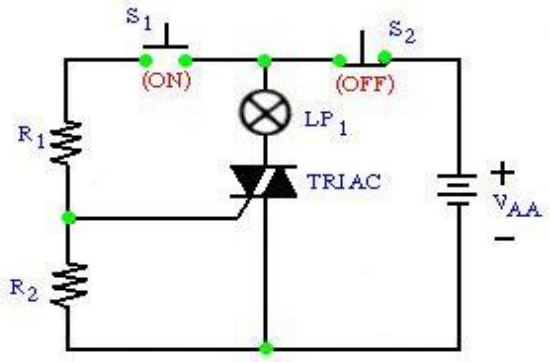
6.กระแสกระตุ้นเกทสูงสุด (PEAK GATE TRIGGER CURRENT) ใช้ตัวย่อ IGTM คือค่ากระแสกระตุ้นที่ไหลผ่านเกทค่าสูงสุดยังคงทำให้ไตรแอกทำงานได้

7.ย่าน อุณหภูมิในการทำงาน (OPERATING JUNCTION TEMPETRATURE RANGE) ใช้ตัวย่อ Tj คือ ย่านอุณหภูมิตรงย่อที่ไตรแอก ทำงานได้โดยไม่ชำรุดเสียหาย



รูปที่ 3.10 รูปร่างของไตรแอกแบบต่าง ๆ

การทำงานของไตรแอกต่อแรง ดันไฟตรง



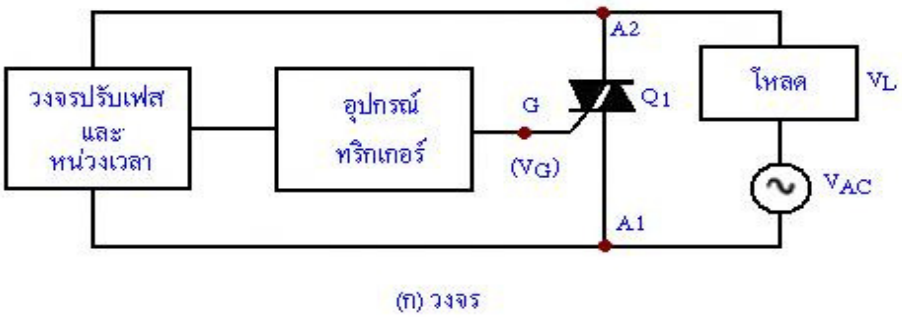
รูปที่ 3.11 วงจรปิด-เปิดการทำงานแบบเบื้องต้น

จากรูปที่ 3.11อธิบายได้ดังนี้

สวิตซ์ S1 ในสภาวะปกติจะตัดวงจร และสวิตซ์ S2 ปกติจะต่อวงจรเมื่อสวิตซ์ S1 เป็นการต่อวงจร ทำให้มีแรงดันบวกมาตกคร่อมขาบนของ R2 ซึ่งถูกจ่ายเป็นไบอัสไปกระตุ้นต้นขา G ของไตรแอก ไตรแอกจะนำกระแสทำให้หลอดไฟ LP1 ติดสว่าง ไตรแอกจะหยุดนำกระแสต้องกดสวิตซ์ S2 ทำให้แหล่งจ่าย VAA ถูกตัดออก

การทำงานของไตรแอกต่อแรง ดันไฟสลับ

ไตรแอกสามารถนำกระแสได้ทั้งช่วงบวกและช่วงลบของแรงดัน ดังนั้นจึงมักนิยมนำไตรแอกไปใช้กับแรงดันไฟสลับ

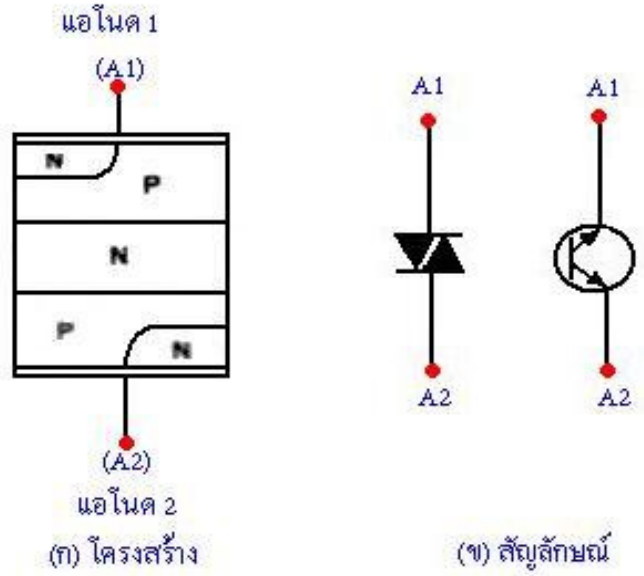


รูปที่ 3.12 วงจรของไตรแอกในการทำงานต่อแรงดันไฟสลับ

จากรูปที่ 3.12 เป็นวงจรไตรแอกในการทำงานต่อแรงดันไฟสลับ ไตรแอกสามารถนำกระแสได้ทั้งช่วงบวกและช่วงลบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟสลับที่ไปกระตุ้นขา G และขึ้นอยู่กับแรงดันไฟสลับที่จ่ายให้ขา A1 และขา A2 โดยทำงานได้ทั้งหมด 4 สภาวะดังได้กล่าวมาแล้ว

ไดแอก DIAC

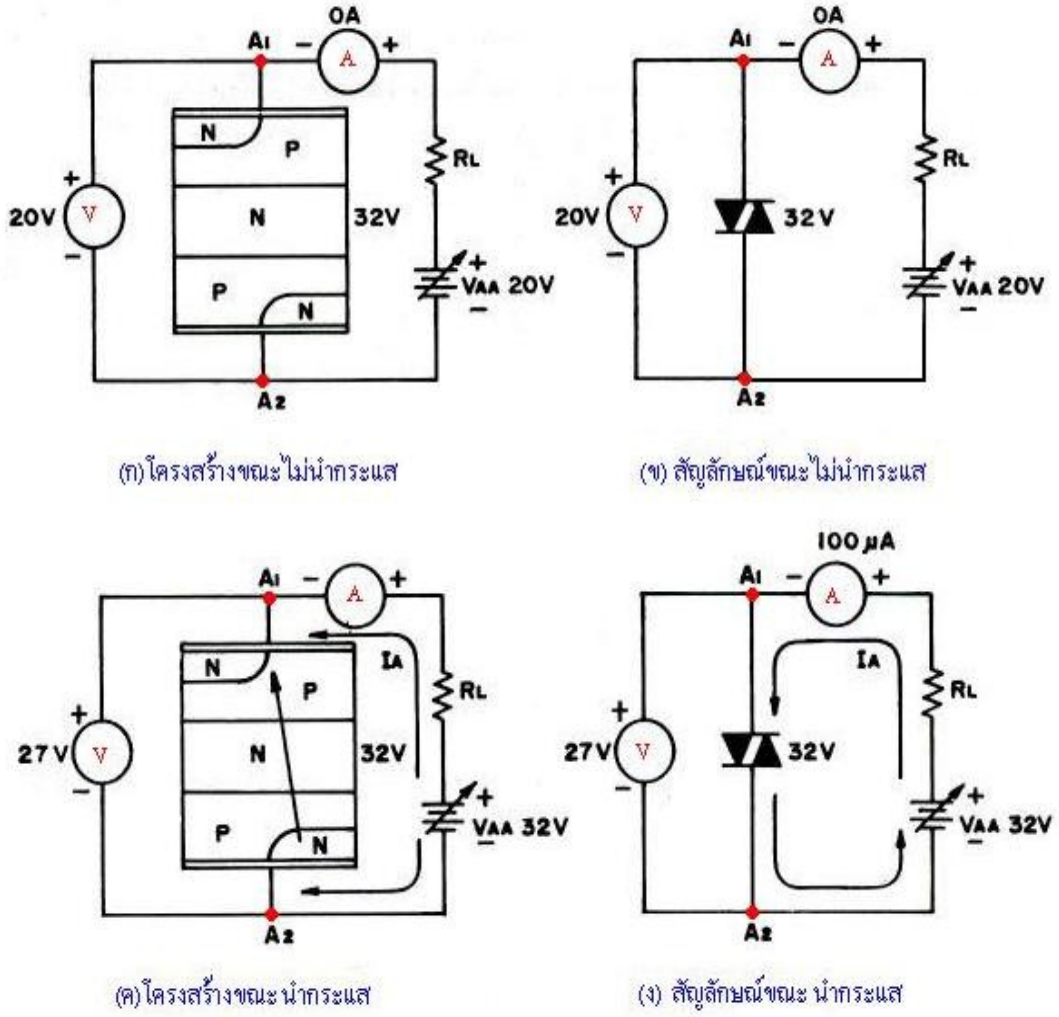
ไดแอกเป็น อุปกรณ์ประเภทสารกึ่งตัวนำอีกแบบหนึ่ง ที่มีขาเพียง 2 ขา หรือเพียง 2 ขั้ว ที่สามารถนำไปใช้กับแรงดันไฟสลับได้ ไดแอถูกสร้างขึ้นมาเพื่อนำมาใช้งานร่วมกับไตรแอก โดยนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ทริกเกอร์หรืออุปกรณ์กระตุ้นขาเกทของตัวไตรแอก เพื่อเป็นการป้องกันแรงดันไฟกระโชกจำนวนมาก ที่อาจจะป้อนเข้าขาเกทของไตรแอก จนเป็นเหตุให้ขาเกทของไตรแอกชำรุดเสียหายทันที โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไดแอก แสดงไว้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไดแอก

จากรูปที่ 3.13 ไดแอกสามารถนำไปใช้ได้กับแรงดันไฟสลับ สามารถทำงานได้ทั้งแรงดันช่วงบวกและแรงดันช่วงลบ มีขาต่อใช้งาน 2 ขา คือ ขาแอโนด (ANODE 1) ใช้ตัวย่อ A1 หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าขาเมนเทอร์มินอล 1 (MAIN TERMINAL 1) ใช้ตัวย่อ MT1 และขาแอโนด (ANODE2) ใช้ตัวย่อ A2 หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเขาเมนเทอร์มินอล 2 (MAIN TERMINAL 2) ใช้ตัวย่อ MT2 แต่ละขาของไดแอกจะต่อรับแรงดันไฟสลับได้เหมือนกัน

การทำงานของไดแอก

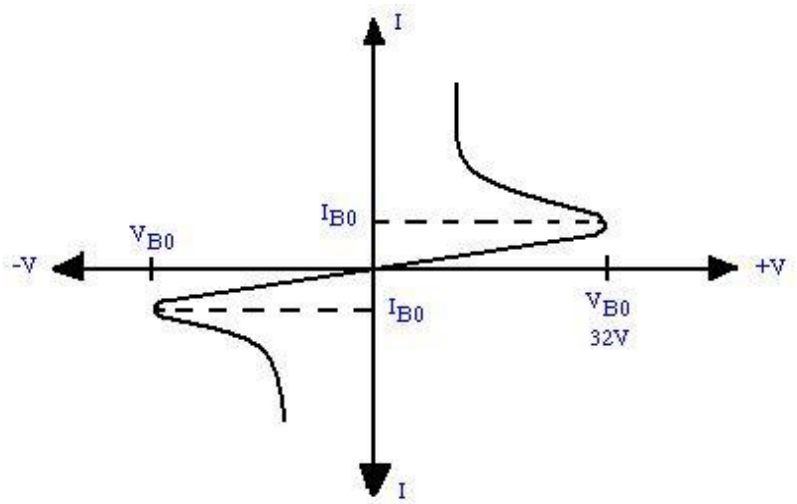


รูปที่ 3.14 การทำงานของไดแอกเมื่อจ่ายไบอัสบวกให้ขา A1 ลบให้ขา A2

จากคุณสมบัติของไดแอกที่ว่าจะนำกระแสเมื่อมี แรงดันตกคร่อมตัวมันถึงค่าแรงดันเบรคโอเวอร์เท่านั้น ดังนั้นจากรูปที่ 3.15 (ก) และ (ข) สมมติว่าไดแอกตัวนี้มีแรงดันเบรคโอเวอร์ที่ 32 โวลต์ แรงดันแหล่งจ่าย VAAจ่ายเข้ามาเพียง 20 โวลต์ ต่ำกว่าแรงดันเบรคโอเวอร์ของไดแอก ตัวไดแอกจะยังไม่นำกระแส ความต้านทานในตัวไดแอกสูงมาก ทำให้มีศักย์ตกคร่อมตัวไดแอกเท่ากับแหล่งจ่ายแรงดัน VAA ที่ป้อนเข้ามา

จากรูปที่ 3.15 (ค) และ (ง) เมื่อปรับแรงดันจากแหล่งจ่าย VAA ให้ไดแอกถึงค่าแรงดันเบกโอเวอร์ หรือเกินกว่าค่าแรงดันเบรคโอเวอร์ ไดแอกจะนำกระแสทำให้ค่าความต้านทานในตัวไดแอกต่ำลง มีกระแสไหลผ่านตัวไดแอกมากค่าหนึ่งขึ้นอยู่กับค่าแรงดันที่ป้อนให้ เมื่อไดแอกนำกระแสจะมีศักย์ตกคร่อมตัวมันลดลงจากเดิมอีกเล็กน้อย ตามรูป 3.15 (ค) และ (ง) แรงดันจะตกคร่อมตัวไดแอกลดลงจากเดิมอีก 5 โวลต์

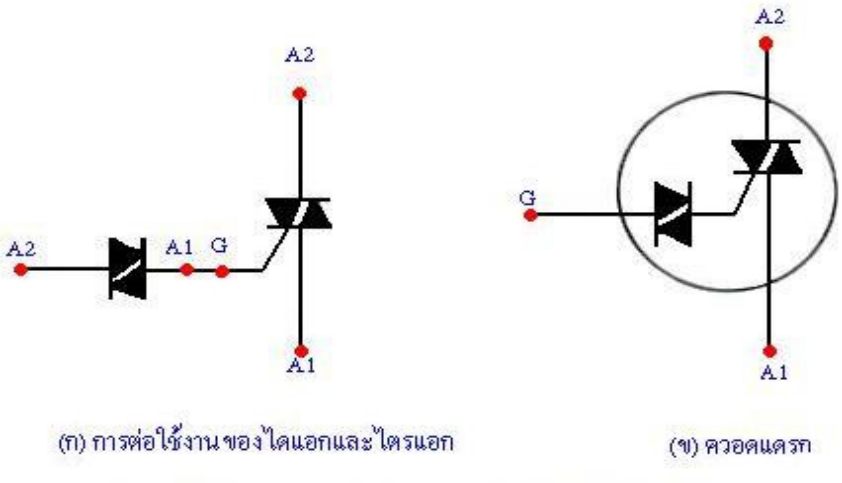
กร๊าฟคุณสมบัติของไดแอก



รูปที่ 3.15 กร๊าฟคุณสมบัติของไดแอก

จากรูปที่ 3.15 เป็นกร๊าฟแสดงคุณสมบัติของตัวไดแอก โดยไดแอกจะสามารถนำกระแสได้ทั้งช่วงบวกและช่วงลบของแรงดันไฟสลับ การจ่ายแรงดันให้ไดแอกในครั้งแรกจะมีกระแสไหลผ่านตัวไดแอกน้อยมาก เรียกว่ากระแสรั่วซึม เมื่อเพิ่มแรงดันให้ตัวไดแอกมากขึ้นจนถึงค่าแรงดันเบรคโอเวอร์ (BREAKOVER VOLTAGE) ใช้ตัวย่อ VBO จะทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวไดแอกถึงค่ากระแสเบรคโอเวอร์ (BREAKOVER CURRENT) ใช้ตัวย่อ IBO ตัวไดแอกจะนำกระแสยอมให้กระแสไหลผ่านตัวมัน ทำให้ค่าความต้านทานในตัวไดแอกลดลง ยิ่งจ่ายแรงดันไบอัสให้ตัวไดแอกยิ่งมากขึ้น จะยิ่งทำให้ค่าความต้านทานในตัวไดแอกยิ่งลดลด กระแสจะยิ่งไหลเพิ่มมากขึ้นเป็นลำดับ

ควอดแดรก (QUADRAC) ก็คือ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทไทริสเตอร์เช่นเดียวกับไตรแอกนั่นเอง ควอดแดรกถูกผลิตขึ้นมาโดยการรวมตัวไตรแอก และตัวไดแอกเข้าไว้ในตัวเดียวกัน ลักษณะการต่อไดแอกและไตรแอก เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ควอดแดรก แสดงเป็นสัญลักษณ์ได้รูปที่ 3.16

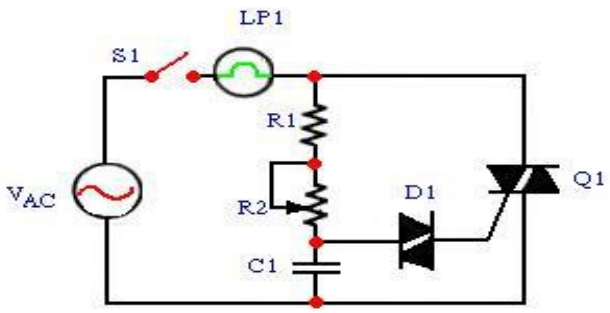


รูปที่ 3.16 สัญลักษณ์ของไดแอกต่อกับไตรแอก เปรียบเทียบกับควอดแดรก

เป็นสัญลักษณ์ของควอแดรก ตัวจริงจะมีเพียง 3 ขา คือ A2, A1 และ G และลักษณะรูปร่างทั่ว ๆ ไปก็เหมือนกับไตรแอกทุกประการ

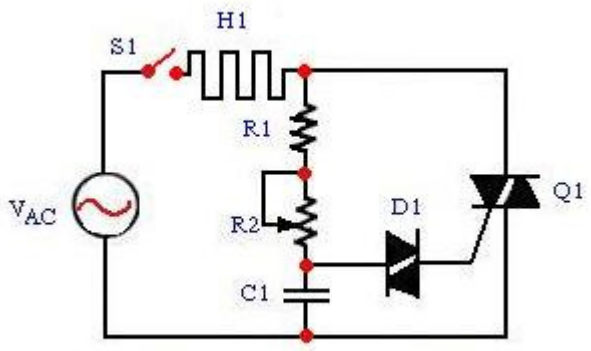
การนำไดแอกและไตรแอกไปใช้งาน

1. วงจรหรี่ไฟหรือหรี่ขดลวดความร้อน



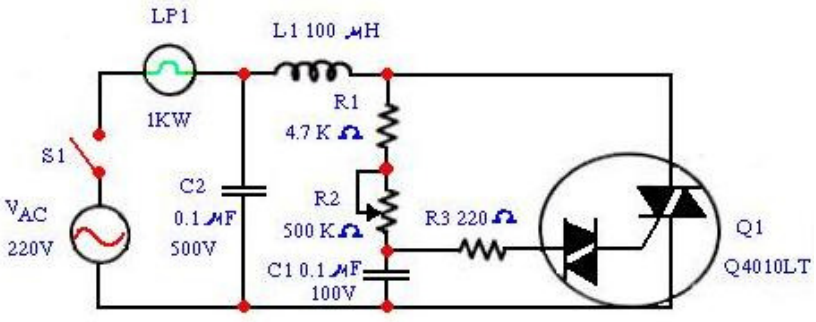
รูปที่ 3.17 วงจรหรี่ไฟ

จากรูปที่ 3.17 เป็นวงจรหรี่หลอดไฟฟ้า โดยใช้ไดแอกและไตรแอกความสว่างของหลอดไฟ LP1 จะสว่างขึ้นหรือมืดลง จะถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมและหน่วงเวลา R1 , R2 และ C1 การทำงานดังกล่าวทำหใสามารถปรับเปลี่ยนความสว่างของหลอดไฟ LP1 ได้โดยอาศัยการปรับเปลี่ยนเวลาและมุมเฟสของแรงดันที่จะทำให้ไดแอกนำกระแส และไปทำให้ไดแอกนำกระแสกำลังไฟฟ้าที่ตกคร่อมหลอดไฟ LP1 จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย หลอดไฟ LP1 ก็จะมีความสว่างเปลี่ยนแปลงไป ถ้าจะนำวงจรดังกล่าวไปหรี่ขดลวดความร้อนของเตาไฟฟ้า กระทะไฟฟ้า กาต้มน้ำไฟฟ้า เตารีดไฟฟ้าและอื่น ๆ วงจรก็สามารถต่อได้เหมือนเดิมดังรูปที่ 3.18



รูป ที่ 3.18 วงจรหรี่ขดลวดความร้อน

2. วงจรหรี่ไฟแสงสว่างที่มีชุดป้องกันสัญญาณรบกวน



รูปที่ 3.19 วงจรหรี่ไฟแสงสว่างที่มีชุดป้องกันสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 3.19 เป็นวงจรหรี่ไฟแสงสว่างที่มีชุดป้องกันสัญญาณรบกวน ส่วนประกอบวงจรป้องกันสัญญาณรบกวนคือ C1 และ C2 โดย L1 มีค่าประมาณ 100 mH ทำหน้าที่หน่วงกระแสไฟฟ้าให้ไหลเปลี่ยนแปลงช้าลง เป็นการป้องกันไม่ให้กระแสกระโชกในวงจรมากเกินไป L1 จะต่ออันดับกับหลอดไฟ LP1 ดังนั้น L1 จะต้องทนกระแสที่ไหลผ่านวงจรได้ด้วย ส่วน C2 ทำหน้าที่กำจัดความถี่ฮาร์โมนิคสูง ๆ ลงการวด์ ไม่ส่งออกไปรบกวนภายนอก ตัวต้านทาน R3 ใส่ไว้ในวงจรเป็นการช่วยลดระดับความแรงของแรงดันที่จะป้อนให้ขา G จากการประจุแรงดันของ C1 ตัวต้านทาน R1, R2 และตัวเก็บประจุ C1 ทำหน้าที่เป็นชุดควบคุมและหน่วงเวลาแรงดันที่จะไปกระตุ้นที่ขา G การทำงานของวงจรจะเหมือนกับวงจรหรี่ไฟรูปที่ 3.18 นั่นเอง

FET (Field Effect Transistor)

FET คือ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่อาศัยสนามไฟฟ้ามาควบคุมการไหลของกระแส FET จัดอยู่ในประเภท Unipolar Device เพราะว่ากระแสที่ไหลใน Channel เป็นการเคลื่อนที่ของพาหะประเภทเดียว โดยสรุป FET ชนิดต่าง ๆ แบ่งได้ดังนี้

1. FET (Junction Field Effect Transistor)

1.1 N - Channel

1.2 P - Channel

2. MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET)

2.1 Depletion Type

2.1.1 N - Channel

2.1.1 P – Channel

2.2 Enhancement Type

2.2.1 N - Channel

FET ย่อมาจาก Field Effect Transistor เป็นอุปกรณ์ Semiconductor มี 3 ขา คือ Gate-Drain-Source ซึ่งทำงานโดยการอาศัยแรงดันที่ต่างกันระหว่างขา Gate-Source มาเปิด Channel ระหว่างขา Source-Drain ให้ยอมให้กระแสไหลผ่านได้ ว่าง่าย ๆ ก็คล้าย ๆ Relay นั่นเอง เพียงแต่ว่า Relay ใช้การเหนี่ยวนำ เพื่อให้แผ่นโลหะสองแผ่นแตะกัน แต่ตัว FET ไม่มีการสัมผัสกันของโลหะเฟสเป็นทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่ง มีโครงสร้าง แตกต่างไปจากทรานซิสเตอร์ ทั่วไป และมี ข้อดี กว่าทรานซิสเตอร์ทั่วไปหลายประการ คือต่อขยายหลายภาคได้ดี ทำงานที่ อุณหภูมิสูงได้ ดี มีสัญญาณรบกวนต่ำ มีอิมพีแดนซ์สูง เป็นต้นเฟตแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ JFET และ MOSFET และโครงสร้างมี 2 ชนิด คือ P แชนแนลและ Nแชนแนล MOSFET ยังแบ่งย่อยออกได้เป็นดีพลีชัน MOSFET และเอนฮานซีเมนต์ MOSFETJFET นั้นส่วนของเกตเดรนและซอสถูกต่อถึงกันทั้งหมด การจ่ายไบอัสให้ JFET ทำงาน ต้องจ่ายไบอัสตรงให้ขา S จ่ายไบอัสกลับให้ขา D กับขา G เทียบกับขา S JFET ทำงานเหมือนหลอดสุญญากาศดีพลีชัน MOSFET ส่วนของเกตถูกแยกออกต่างหากส่วนเดรนและซอส โดยใช้ฉนวน SiO_2 คั่นไว้ส่วนของเดรนและซอสถูก

ต่อถึงกันด้วยฐานรอง (SS) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกับส่วนเดรและซอส การจ่ายไบอัสให้ดีพลีชัน MOSFET ต้องจ่ายไบอัสตรงให้ขา S จ่ายไบอัสกลับใหขา D กับขา Gเทียบกับขา S เหมือนการจ่ายไบอัสให้ JFETเอนฮานซ์เมนต์ MOSFET มีโครงสร้างเหมือนกับดีพลีชัน MOSFET แตกต่างเล็กน้อยในส่วนของเดรนและซอสที่ไม่ต้อถึงกัน การจ่ายไบอัสให้เอนฮานซ์เมนต์ MOSFET จ่ายไบอัสตรงให้ขา G กับขาS เทียบกัน และจ่ายไบอัสกลับให้ขา D ทำให้การทำงานของเอนฮานซ์เมนต์ MOSFET เหมือนการทำงานของทรานซิสเตอร์ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์เฟต (FET) มาจากชื่อเต็มว่า ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์(Field Effect Transistor) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดขั้วเดียว (Unipolar) มีลักษณะโครงสร้างและหลักการทำงานแตกต่างไปจากทรานซิสเตอร์เพราะทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดสองขั้ว การทำงานของทรานซิสเตอร์ต้องอาศัยกระแสช่วยควบคุมการทำงาน ทั้งกระแสอิเล็กตรอนและกระแสโฮล เฟตเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอีกชนิดที่นิยมนำมาใช้งานในการขยายสัญญาณ

และใช้งานในหน้าที่ต่าง ๆ
เช่นเดียวกับ ทรานซิสเตอร์นับวันเฟตยิ่งมีบทบาทเพิ่มมากขึ้นในการนำไปใช้งาน เพราะเฟตมี**<u>คุณสมบัติหลายประการดีกว่าทรานซิสเตอร์สรุปเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้</u>**

• ขบวนการผลิตเฟตสามารถนำไปใช้การผลิต IC ได้
• เฟตสามารถต่อขยายสัญญาณแบบหลายภาคได้ดี
• เฟตทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าทรานซิสเตอร์
• สามารถสร้างเฟตให้มีขนาดเล็กลงได้มากกว่าทรานซิสเตอร์
• เฟตไม่มีผลต่อแรงดันต้านภายในเมื่อนำไปใช้เป็นสวิตช์
• อุณหภูมิมีผลต่อการทำงานของเฟตน้อยกว่าทรานซิสเตอร์มาก
• คุณสมบัติโครงสร้างบางชนิดของเฟตสามารถสร้างให้มีความไวในการทำงานได้ดีกว่าทรานซิสเตอร์
• เฟตมีสัญญาณรบกวนต่ำกว่าทรานซิสเตอร์จึงเหมาะสมกับการใช้งานในภาคขยายสัญญาณอัตราขยายต่ำ

• อิมพีแดนซ์ทางอินพุตของเฟตสูงประมาณ 100 M ? มากกว่าในทรานซิสเตอร์มาก ซึ่งมีค่าเพียงประมาณ 2 k ? เท่านั้นการทำงานของเฟต ต้องใช้แรงดันในการควบคุมกระแสเหมือนกับการทำงานของหลอดสุญญากาศนั่นคือ กระแสจะถูกควบคุมด้วยสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดัน สิ่งนี้เองเป็นเหตุให้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนี้มีชื่อเรียกว่า ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์ซึ่งมีความหมายว่า ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้า

ทำอย่างไรจึงจะรู้ว่า FET ใช้ได้หรือไม่

ก่อนอื่นต้องขอบอกให้ผู้อ่านรู้เสียก่อนว่า FET นั้นคืออะไร คำว่า FET นี้ย่อมาจาก Field Effect Transistor เป็น ทรานซิสเตอร์แบบหนึ่ง ใช้หลักการของสนามไฟฟ้าที่ได้จาก gate มาเป็นตัวควบคุมการไหลของกระแสไฟระหว่าง drain และ source คราวนี้มาถึงคำที่ว่า ” ทำอย่างไรจึงจะรู้ว่า FET ใช้ได้หรือไม่” บางท่านอาจจะตอบได้ทันทีว่า ” ก็เอาไป เช็คซิ ” ถ้าตอบแบบนี้ผู้เขียนรู้สึกว่าจะเป็น คำตอบที่ยียวนเกินไป ผู้เขียนมีจุดประสงค์อยากจะให้ผู้อ่านหรือช่างอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป ได้รู้วิธีเช็ค FETไม่ให้ชำรุดเสียหาย ผู้เขียนรู้ว่าช่าง ส่วนมากจะเช็คทรานซิสเตอร์แบบธรรมดา เป็นทุกคน และก็แน่ใจว่าส่วนมากอีกเช่นกันที่ไม่รู้วิธีเช็ค FETการเช็ค FET ค่อนข้างจะยุ่งยากกว่าการเช็คทรานซิสเตอร์แบบธรรมดา ก่อนเช็คจะต้องรู้ข้อมูลต่อไปนี้เสียก่อน คือ

1. FET นั้นเป็นแบบใด JFET หรือ MOSFET
2. ถ้าเป็น JFET เป็นแบบ N - Channel หรือ P - Channel
3. ถ้าเป็น MOSFET เป็นแบบ Enhancement หรือ Depletion

ข้อควรระวังเป็นพิเศษก็คือ อย่าพยายามถอดประกอบหรือแตะต้อง FET เว้นแต่ว่า FET นั้นเป็นแบบJFET หรือ Insulated - gate - Protected MOSFET เพราะถ้าเป็นแบบอื่น นอกจากที่กล่าวมามานี้จะชำรุดเสียหายจากไฟฟ้า สถิตได้ง่าย โดยเฉพาะเมื่ออากาศแห้ง เช่น ฤดูหนาว แผงวงจรที่มีอุปกรณ์พวกนี้อยู่จะมีป้ายเตือนติดไว้เสมอ เพื่อให้ผู้เกี่ยวข้องได้ระมัดระวัง จะมีตัวอักษร ” ESD” เขียนบอกไว้โดยมากจะมีพื้นสีเหลืองตัวอักษรสีดำ โดยเฉพาะ Uninsulated - gate - Protected MOSFET แล้ว จะ

ชำรุดเสียหายทันทีถ้าไม่ระมัดระวังในการจับถือ แต่เมื่อจำเป็นต้องจับถือหรือถอด ประกอบเข้าในวงจรแล้ว ต้องเพิ่มความระมัดระวังดังนี้

1. ก่อนที่จะประกอบลงในวงจรหรือขณะเก็บรักษาไว้หรือยังไม่ได้ใช้จะต้องทำการลัดวงจรทุกขาให้ถึงกันหมดเสียก่อน ด้วยเหล็กสปริงที่ติดมากับตัว MOSFET จากโรงงานผู้ผลิต หรือด้วยแผ่นโฟมที่เป็นตัวนำก็ได้ห้ามใช้พลาสติกแบบ ที่ทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตได้ง่ายเข้ามาใกล้เป็นอันขาด เช่น สารจำพวกPolystyrene

2. ถ้าจะจับ MOSFET ออกจากวงจรด้วยมือแล้ว มือจะต้องสัมผัสอยู่กับศักย์ไฟฟ้าที่เป็นดิน (ground)ตลอดเวลา ใช้สายโลหะที่เป็นตัวนำ เช่น สายนาฬิการัดข้อมือไว้แล้วต่อสายที่เป็นตัวนำไปคีบกับground

3. ปลายหัวแร้งที่ใช้บัดกรีจะต้องต้อลงดินด้วยเสมอ และหัวแร้งควรเป็นชนิดที่ใช้ไฟ DC จะยิ่งดี ห้ามถอดประกอบ MOSFET เข้าในวงจรขณะมีไฟเลี้ยงอยู่ต่อไปนี้จะเป็นวิธีการเช็ค JFET และ MOSFET แบบง่ายที่สุด โดยจะเช็คความต้านทานทางตรง (forward resistance) และความต้านทานในทางกลับ (reverse resistance) เท่านั้น ก็เพียงพอที่จะรู้ว่า FETนั้นใช้ได้หรือไม่

วิธีเช็ค FET

1. วัดความต้านทานทางตรงของ FET แบบ N - Channel โดยใช้มาตรวัดความต้านทานที่ใช้แบตเตอรี่กำลังดันต่ำ ให้ตั้งระยะไว้ที่ย่าน Rx100 ต้อขั้วบวก (+) ของสายมาตรวัดเข้ากับ gate ขั้วลบ (-) เข้าที่drain หรือ source ถ้าเป็นแบบ P - Channel ให้ต่อสายมาตรวัดรงกันข้ามกับที่กล่าวมาแล้ว มาตรวัดควรชี้ค่าความต้านทานที่ไม่ต่ำจนเกินไป

2. วัดความต้านทานทางกลับของ JFET แบบ N - Channel โดยต่อขั้วลบ (-) ของสายมาตรวัดความต้านทานเข้าที่ gate ขั้วบวก (+) เข้าที่ drain หรือ source มาตรวัดควรชี้ค่าความต้านทานสูงมาก (แสดงว่าใช้ได้) ถ้าชี้ค่าต่ำเกินไป แสดงว่ารอยต่อในตัว FET รั่วหรือลัดวงจร (แสดงว่าใช้ไม่ได้) ถ้าเป็นแบบ P- Channel ให้ต่อสาย มาตรวัดตรงข้ามกับที่กล่าวมาแล้ววิธีเช็ค MOSFET การวัดค่าความต้านทานทางตรงและทางกลับ สามารถทำได้โดยใช้มาตรวัดความต้านทานที่ใช้แบตเตอรี่กำลังดันต่ำ การต่อสานมาตรวัดก็เช่นเดียวกับวิธีเช็ค JFET แต่ต้องใช้ระยะย่าน

Rx1000 หรือระยะสูงสุด MOSFET แบบ Insulated - gate - Protected จะมีความต้านทานทางเข้าสูงมาก ฉะนั้นมาตรวัดจะชี้ค่าความต้านทานสูงมาก ทั้งค่าความ ต้านทานทางตรงและทางกลับ (แสดงว่าใช้ได้) ถ้ามาตรวัดชี้ค่าความต้านทานต่ำเกินไป แสดงว่ามีการรั่วของฉนวน ที่กั้นระหว่าง gate กับ drain หรือ source (แสดงว่าใช้ไม่ได้) จะเห็นว่าไม่ยากเลยที่จะเช็ค FETผู้เขียนหวังเป็นอย่าง มากว่า วิธีเช็ค FET แบบนี้ จะช่วยให้ช่างอิเล็กทรอนิกส์ที่สนใจทุกท่าน นำเอาไปใช้ประโยชน์ได้ไม่มากก็น้อยชนิดและประเภทของ เฟตในปัจจุบันเฟตได้ถูกพัฒนาให้สามารถทำงานและใช้งานกับอุปกรณ์หลายชนิดมากขึ้น ตัวเฟตเองก็ถูกพัฒนาให้มีหลายประเภทและชนิดมากขึ้น เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้เฉพาะเจาะจงมากขึ้น เกิดคุณภาพและประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น เฟตที่สร้างมาใช้งานแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

• จังชันฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์(Junction Field Effect Transistor) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า เจเฟต (JFET) แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือชนิดพีแชนแนล (P-Channel) และชนิดเอ็นแชนแนล (N-Channel)

• เมทอลออกไซด์เซมิคอนดักเตอร์ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์(Metal Oxide Semiconductor FieldEffect Transistor) หรอเรียกย่อ ๆ ว่า มอสเฟต (MOSFET) แบ่งย่อยออกได้เป็น 2 แบบ คือ

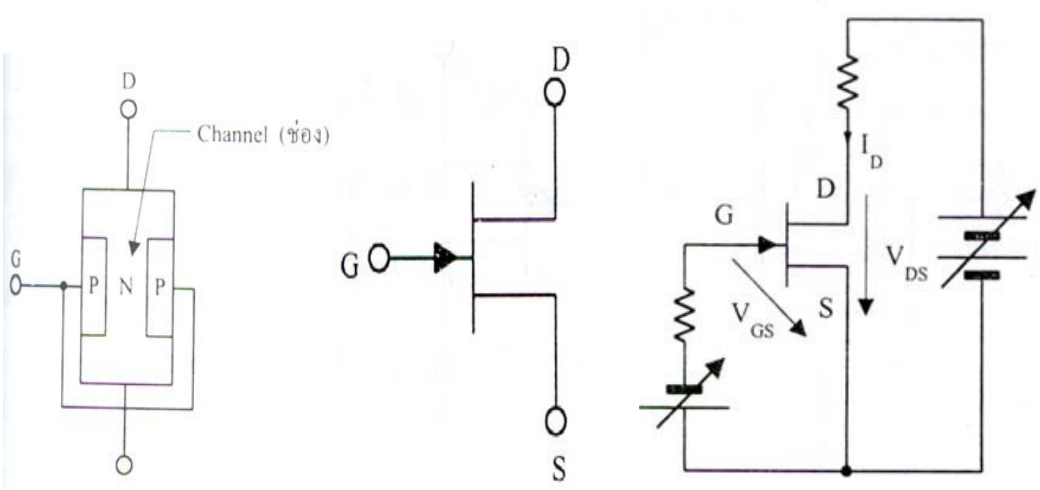
• ดีพลีชันมอสเฟต (Depletion MOSFET) หรือ D – MOSFET แบ่งออกได้2 ชนิดคือ P แชนแนลและชนิด N แชนแนล

• เอนฮานซ์เมนต์มอสเฟต (Enhancement MOSFET) หรือ E – MOSFET แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ ชนิด P แชนแนล และชนิด N แชนแนลเจเฟตชนิดเอ็นแชนแนล

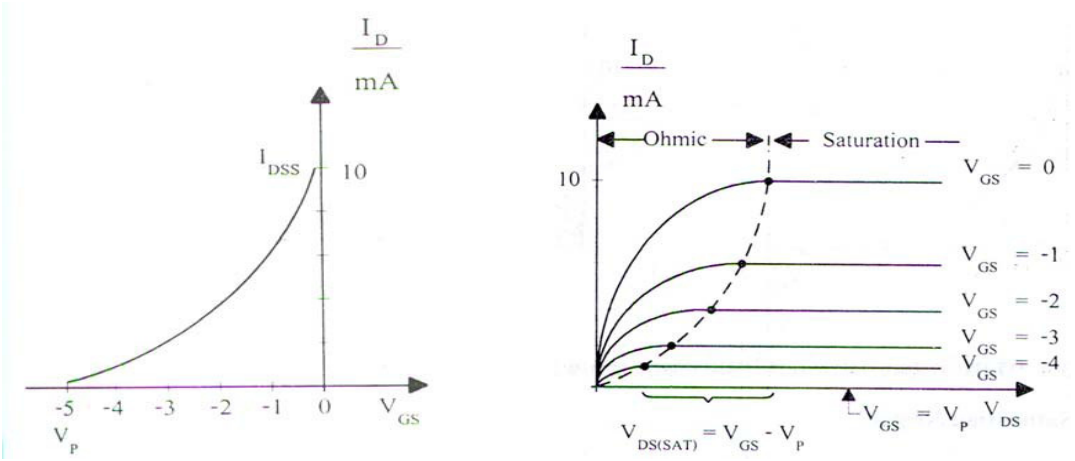
JFET ชนิด N แชนแนลแบบเบื้องต้น ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด N เป็นสารกึ่งตัวนำตอนใหญ่และมีสารกึ่งตัวนำชนิด P ตอนเล็กสองตอน ประกอบร่วมด้านข้าง ใช้การต่อเชื่อมกันแบบแพร่กระจาย

1. FET (Junction Field Effect Transistor)

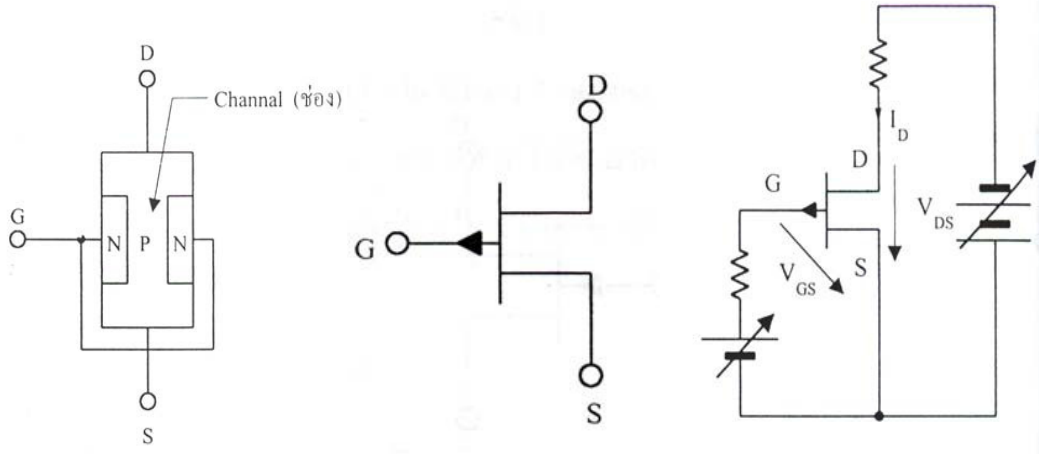
หลักการควบคุม JFET โดยจัดไบอัสย้อนกลับที่ขา G – S นั่นคือ จะไม่มีกระแสไหลที่ขา G เสมอ สำหรับ N – Channel ให้ขา D มีศักย์สูงกว่าขา S และสำหรับ P – Channel ให้ขา D มีศักย์ต่ำกว่าขา S จะ เห็นได้ว่า เมื่อขา G – S ได้รับไบอัสกลับทำให้เกิด Depletion ขึ้นที่ช่อง (Channel) เป็นผลให้ความนำไฟฟ้า เดรนกับซอร์สมีค่าลดลง กระแสเดรนก็จะมีค่าลดลง ถ้าไบอัสกลับที่ขา G – S มากขึ้นจนกระทั่ง กระแสโครนเท่ากับศูนย์พอดี ค่าแรงดันไฟฟ้าไบอัสกลับที่ขา G – S นี้เรียกว่า “Pinch Off Voltage” (VP) หรือ VGS (OFF) ข้อควรระวังในการใช้ JFET คือ การป้อนไบอัสตรงที่ขา G – S ถ้ากระแสนั้นมีค่า สูงเกินไป ทำให้รอยต่อ P – N ระหว่างขา G – S เสียหายได้



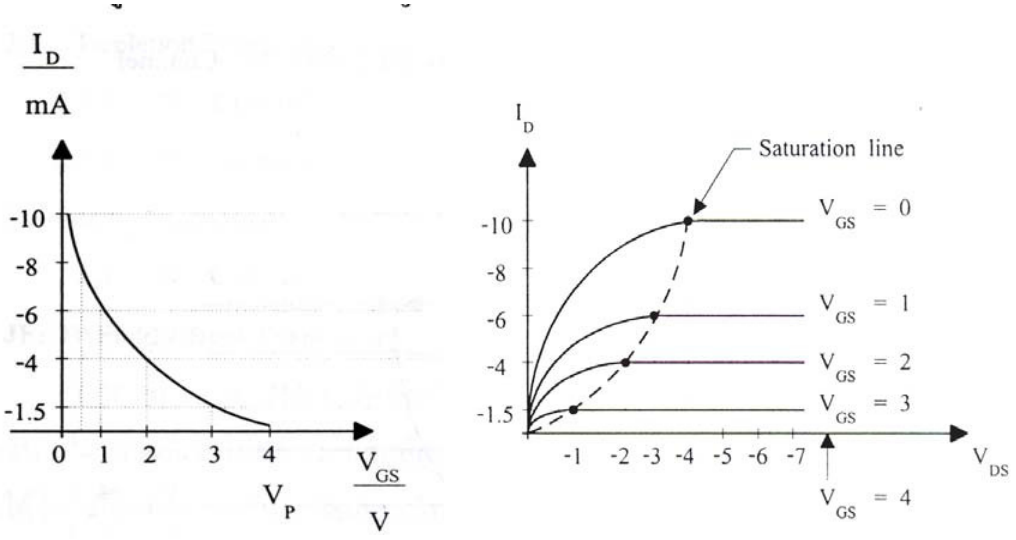
รูปที่ 3.1 โครงสร้าง สัญลักษณ์ และวงจรพื้นฐานของ JFET ชนิด N – Channel



3.2 กราฟลักษณะสมบัติการโอนย้ายและลักษณะสมบัติด้านเดรนของ JFET ชนิด N – Channel



รูปที่ 3.3 โครงสร้าง สัญลักษณ์ และวงจรพื้นฐานของ JFET ชนิด P – Channel



รูปที่ 3.4 กราฟลักษณะสมบัติการโอนย้ายและลักษณะสมบัติด้านเดรนของ JFET ชนิด P – Channel

สมการ “Saturation Region”

$$I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

IDSS = กระแสเดรน เมื่อ VGS = 0

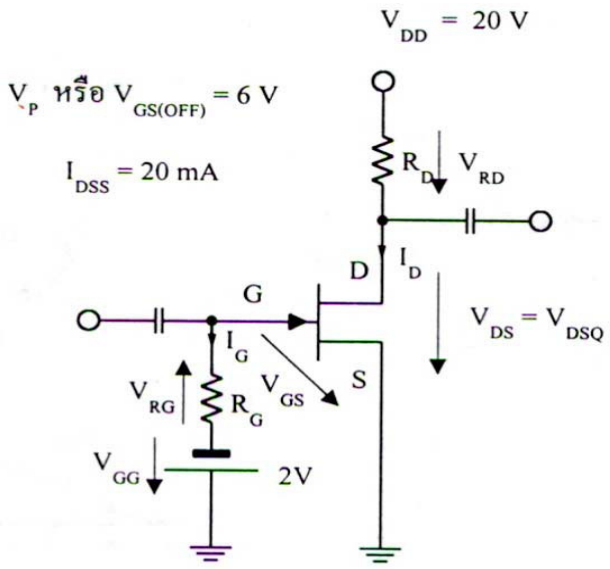
VP หรือ VGS (OFF) = ค่าแรงดัน VGS ที่ทำให้ JFET หยุดนำกระแส สมการนี้ใช้เฉพาะย่านอิ่มตัว โดยทั่วไป JEFT แต่ละเบอร์จะบอกค่า VP และ IDSS ซึ่งเรา สามารถนำไปเขียนกราฟลักษณะสมบัติการโอนย้ายได้โดยไม่ต้องทำการทดลอง โดยใช้สมการข้างบน

ลักษณะสมบัติทางด้านเดรนที่น่าสนใจคือ สมมติว่า เมื่อ VGS คงที่ไว้ แล้วปรับค่าแรงดันตกคร่อม ระหว่างขา D – S เพิ่มขึ้น ก็จะทำให้กระแสเดรนเพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะสมบัติในช่วงนี้ JFET จะเหมือนกับ ตัวต้านทานคงที่ธรรมดาตัวหนึ่งการทำงานในย่านนี้เรียกว่า “ย่านโอห์มมิเตอร์” แต่ถ้าเพิ่มแรงดันตกคร่อมขา

D – S ถึงจุด ๆ หนึ่ง และเพิ่มต่อไป กระแสเดรนจะไม่เพิ่มอีก กล่าวคือ มีค่าคงที่ นั่นคือ JFET ทำงานอยู่ ในย่านอิ่มตัวนั่นเอง ค่าแรงดันตกคร่อมระหว่าง D – S ที่เริ่มทำให้ JFET ทำงานในย่านอิ่มตัวเรียกว่า “VDS (SAT)” เราสามารถหา VDS (SAT) ได้จาก VDS (SAT) = VGS – VP

ตัวอย่างการไบอัส JFET

Fixed Bias



รูปที่ 3.5 Fixed Bias

VRE + VGS = VGC แต่ IG = 0 ทำให้ VRG = 0 ด้วย VGS = VGG = -2 V (VGS ได้รับไบอัสกลับ)

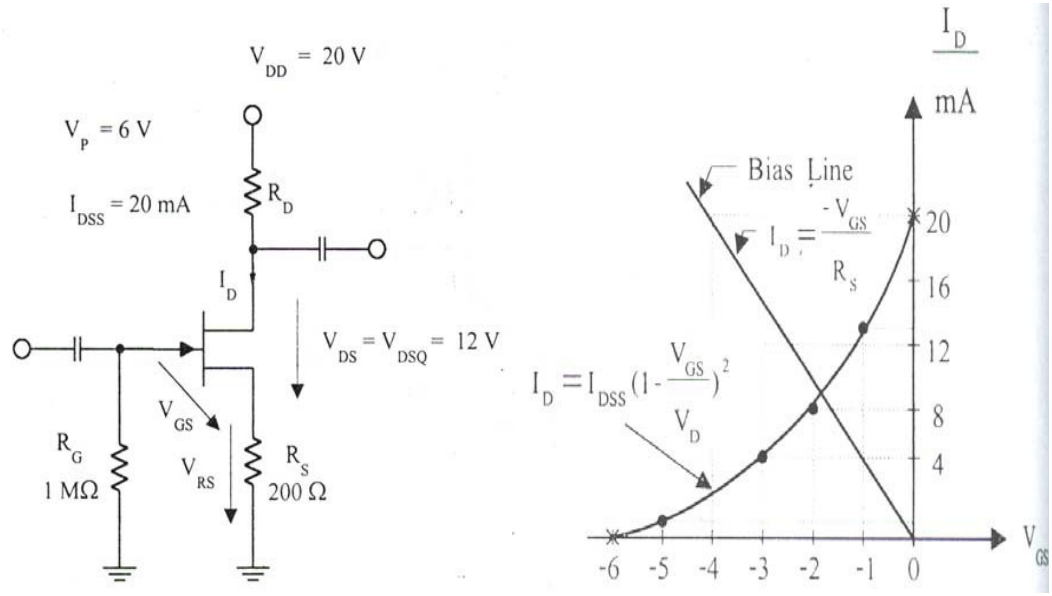
$$\text{จาก} \qquad I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

$$\therefore \qquad I_{DQ} = 200\,\text{mA}\left(1 - \frac{2}{6}\right)^2$$

$$= 8.9\,\text{mA}$$

Self Bias

จาก $$I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$ เขียนกราฟการโอนย้ายของ JFET ได้ดังนี้



รูปที่ 3.5 Fixed Bias

เนื่องจากเราไม่ทราบ VGS แต่จากวงจร VGS = - ID RS นำไปสร้างเส้น Bias Line หา IDQ จาก

$$I_{DQ} = I_{DSS}\left(1 - \frac{I_{DQ}R_S}{V_P}\right)^2$$

$$I_{DQ} = 20\,\text{mA}\left(1 + \frac{I_{DQ}R_S}{-6}\right)^2$$

$$I_{DQ} = 20\,\text{mA}\left(1 - \frac{200I_{DQ}}{6}\right)^2$$

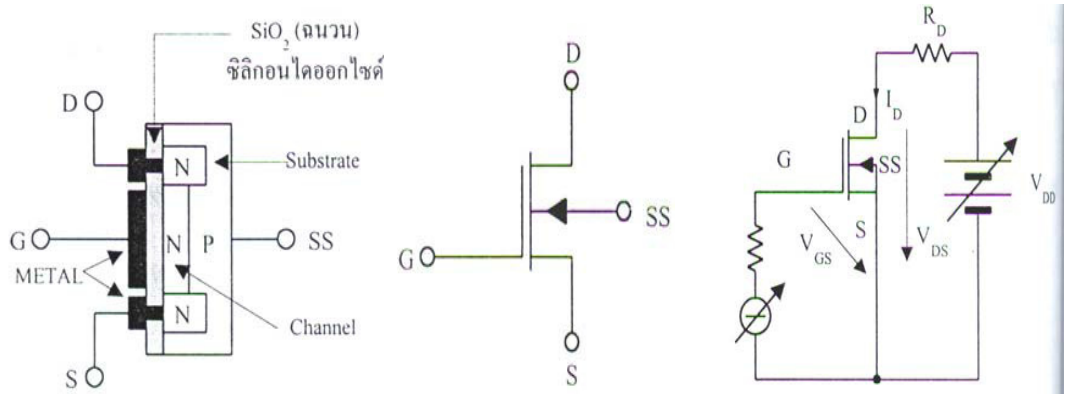
แก้สมการจะได้ IDQ = 9.14 mA และ 95 mA ที่ IDQ = 95 mA เป็นค่าที่ไม่ถูกต้องดังนั้น IDQ = 9.41 mA และ VGSQ = - IDRS = -9.14 mA 200 Ω = -1.9 V

2. MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET)

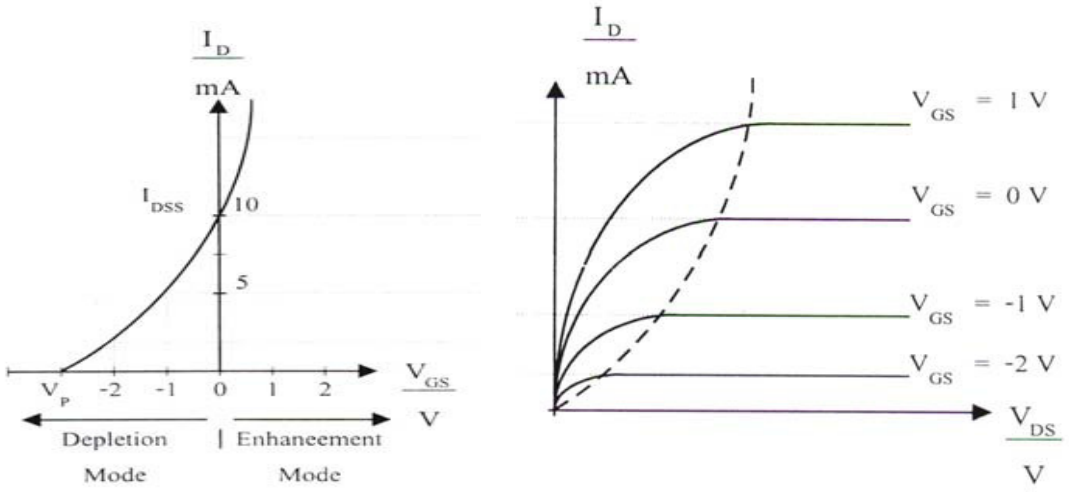
เนื่องจากมีฉนวน (Insulated) ที่ทำมาจาก SiO2 กันระหว่างเกตกับช่อง (Channel) จึงเรียก MOSFET อีกหนึ่งชื่อ คือ “Insulated Gate FET” (IGFET) และจากฉนวนที่กั้นนี้เองทำให้ไม่มีกระแสไหลที่ขา G (Gate)

2.1 Depletion – Type MOSFET (DMOSFET)

2.1.1 DMOFET N - Channel

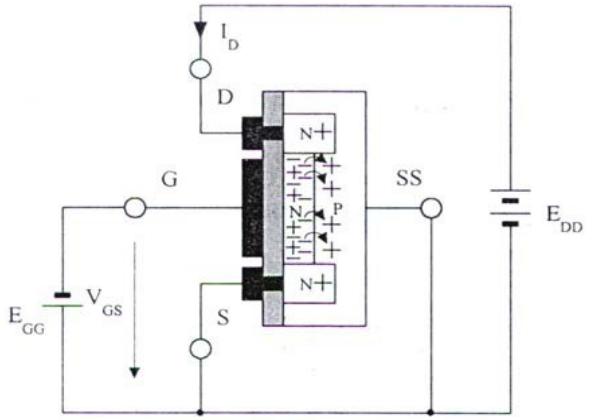


รูปที่ 3.6 โครงสร้าง สัญลักษณ์ วงจรพื้นฐาน



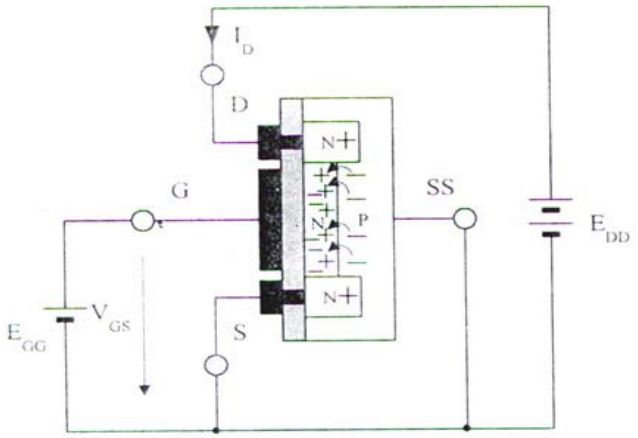
รูปที่ 3.7 กราฟลักษณะการโอนย้าย กราฟลักษณะด้านเดรน

หลักการทำงาน



รูป 3.8 การทำงานใน Depletion – Mode

จากวงจร รูป 3.8 เมื่อ VGS เป็นลบ ขั้วบวกของ EGG จะดึงอิเล็กตรอนอิสระของซับสเตรทเข้ามา และผลักโฮลของซับสเตทไปอยู่บริเวณรอยต่อของ N – Channel ขณะเดียวกันขั้วลบของ EGG จะสร้างสนาม ไฟฟ้า ผลักอิเล็กตรอนอิสระของ N – Channel ไปอยู่บริเวณรอยต่อทำให้อิเล็กตรอนอิสระของ N - Channel ข้ามรอยต่อมารวมตัวกับโฮลของซับสเตรท ทำให้อิเล็กตรอนอิสระของ N – Channel มีจำนวนลดลง นั่นคือ ค.ต.ท. ของ N – Channel จะสูงขึ้น กระแสเดรน ID ก็จะไหลเข้าขา D ผ่าน N – Channel และออกมาที่ขา S ได้น้อยลง



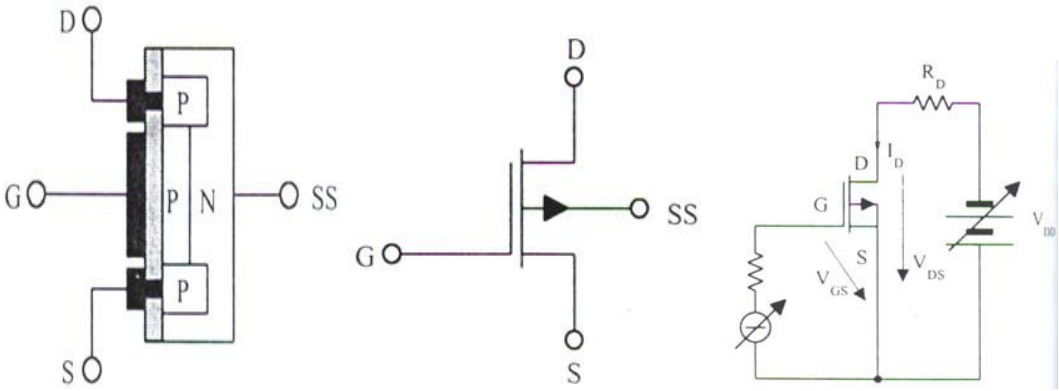
รูปที่ 3.9 การทำงานใน Enhancement - Mode

จากวงจรรูป 3.9 เมื่อ VGS เป็นบวก ขั้วบวกของ EGG จะสร้างสนามไฟฟ้าผลักโฮล (พาหะส่วนน้อย) ของ N – Channel ไปอยู่บริเวณรอยต่อ และขั้วลบของ EGG จะผลักพาหะส่วนน้อย (อิเล็กตรอนอิสระ) ของสาร P ซับสเตรท ไปอยู่บริเวณรอยต่อ ทำให้พาหะส่วนน้อยหรืออิเล็กตรอนอิสระของสาร P (ซับสเตรท) ข้ามรอยต่อไปรวมตัวกับโฮลของ N – Channel ทำให้สภาพความนำของ N – Channel สูงขึ้น (เพราะว่าจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมีค่ามากขึ้น) กระแสเดรน ID ก็จะไหลเข้าขา D ผ่าน N – Channel และ ออกมาที่ขา S มากขึ้น จากหลักการดังกล่าว

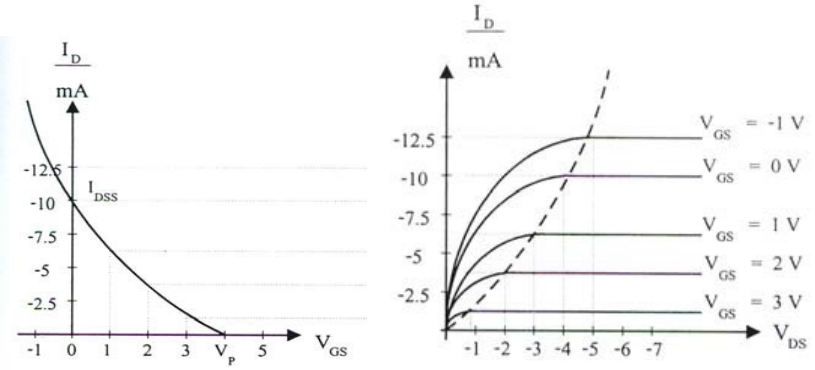
แสดงได้ดัง กราฟลักษณะสมบัติโอนย้าย สมการของกราฟลักษณะสมบัติ โอนย้ายจะเหมือนของ JFET คือ

$$I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

2.1.2 DMOSFET P – Channel



รูปที่ 3.10 โครงสร้าง สัญลักษณ์และวงจรพื้นฐาน



รูปที่ 3.11 กราฟลักษณะสมบัติการโอนย้ายและกราฟลักษณะสมบัติด้านเดรน

หลักการทำงาน

DMOSFET P - Channel จะมีหลักการทำงานเช่นเดียวกันกับ DMOSFET N – Channel โดยการไบอัสจะตรงข้ามกัน กล่าวคือ VDS จะมีค่าเป็นลบ จึงต้องต่อ VSS ดังรูป นั่นคือ เมื่อ DMOSFET P – Channel นำกระแส จากวงจร ID จะอ่านค่าได้เป็นลบ โดยที่ VGS จะอ่านค่าได้เป็นลบ โดยที่ถ้า VGS มี ค่าเป็นลบ จะทำให้กระแสมีประมาณมาก เมื่อ VGS = 0 กระแสเดรนจะเท่ากับ IDSS ถ้า VGS เป็นบวกกระแส เดรนก็จะลดลง จากรูปเมื่อ VGS = VP = 4 V ทำให้ ID = 0 mA สำหรับสมการก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกันคือ

$$I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

การคำนวณเบื้องต้น

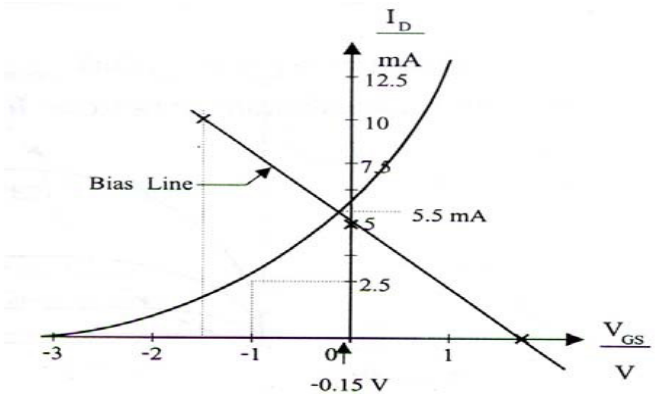
ตัวอย่างที่ 1 จงเขียนลักษณะสมบัติการโอนย้ายของ DMOSFET N – Channel เมื่อมีค่า I_{DSS} = 6 mA และ V_P = -3 mA และวงจร 3.12 หาค่า V_{GS}, I_D , และ V_{DS}

วิธีทำ จาก

$$I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

VGS	-1.5	0	1.5	V
ID	10	5	0	mA

ตารางที่ 3.3 เขียน Bias Line



รูปที่ 3.12 Bias Line

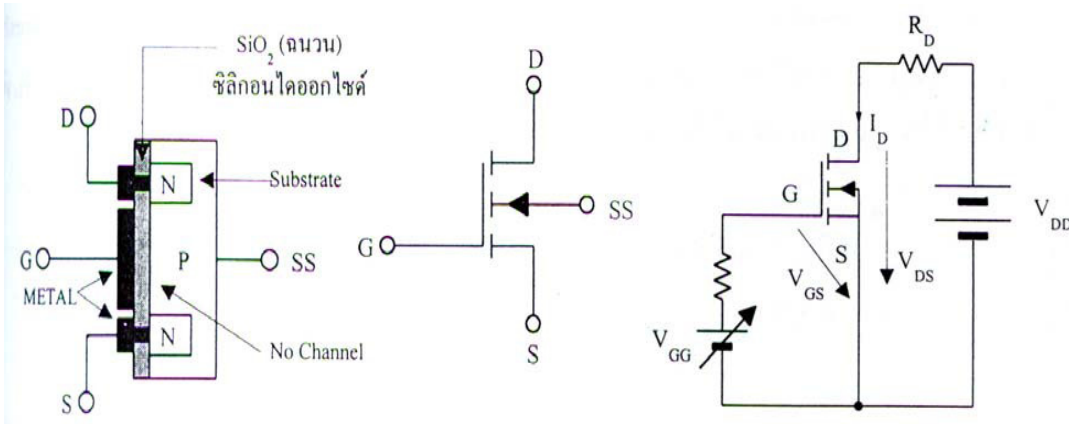
จากกราฟจะได้ VGS = - 0.15 V และ ID = 5.5 mA

VDS = 18 – ID 1.8 k – ID 300

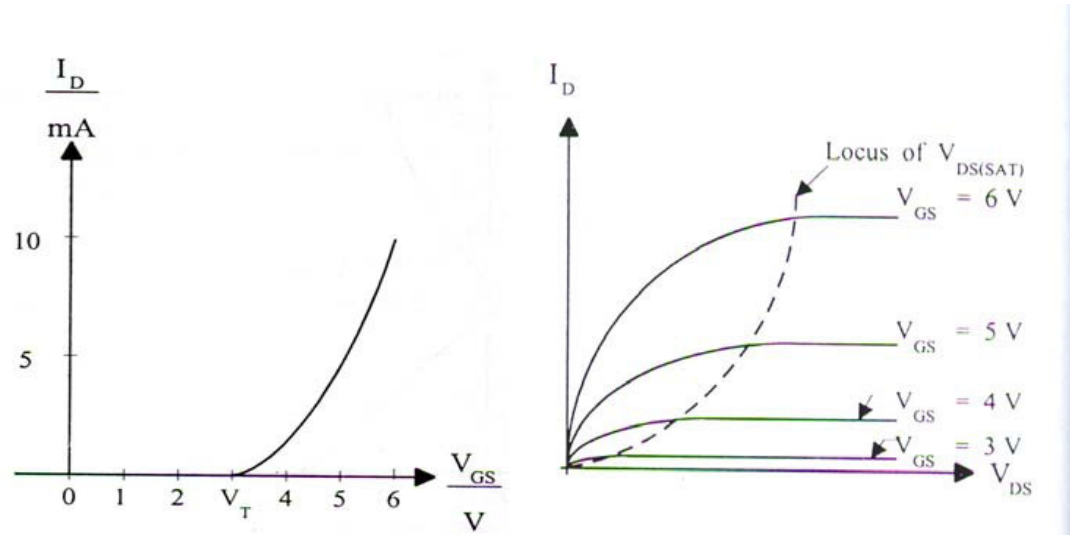
VDS = 6.45 V

2.2 Enhancement – Type MOSFET (EMOSFET)

2.2.1 EMOSFET N - Channel



รูปที่ 3.13 โครงสร้าง สัญลักษณ์และวงจรพื้นฐาน

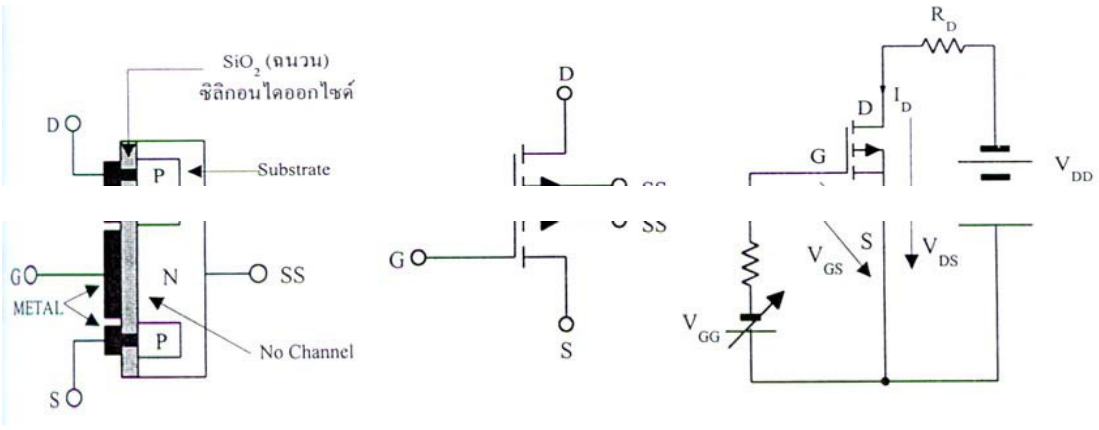


รูปที่ 3.14 กราฟลักษณะสมบัติการโอนย้าย กราฟลักษณะสมบัติด้านเดรน

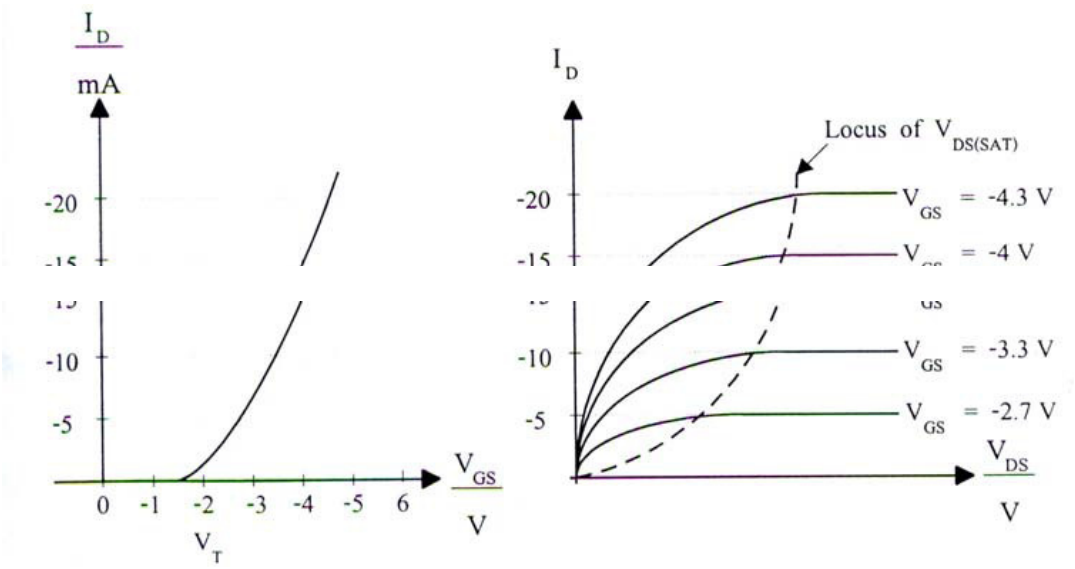
หลักการทำงาน

จากโครงสร้างจะพบว่า EMOSFET N – Channel จะไม่มีช่องสำหรับกระแสไหลผ่าน ระหว่างขา Dc และขา S การควบคุม ให้ EMOSFET นำกระแส ทำได้โดยให้ VGS มีค่าเป็นบวก (ขา G มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าขา S และ SS) และให้ขา D มีศักย์สูงกว่าขา S จากรูป ก ขั้วบวกของ EGG จะต่ออยู่กับแท่งโลหะของขา G ซึ่งทำ ให้อิเล็กตรอนอิสระซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยของ P Substrate มารวมกันที่บริเวณ SiO2 ที่กั้นระหว่าง Substrate กับแท่งโลหะขา G ซึ่งอิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็น Channel หรือเรียกว่า “Induced Channel” ดังนั้นก็จะมีกระแสเดรนไหลเข้าขา D ผ่าน Induced Channel และขา S ถ้าแรงดันที่ตกคร่อมขา G – S (VGS) น้อยไป กระแสเดรนก็จะยังไม่ไหล จนกว่า VGS จะมีสูงถึงปริมาณค่า ๆ หนึ่ง เรียกว่า “Threshold Voltage” (VT) ก็จะให้มีกระแสเดรนไหลผ่านได้ (ดูได้จากกราฟลักษณะสมบัติการโอนย้าย) ความสัมพันธ์ ของ ID กับ VGS สามารถเขียนได้ดังนี้ ID = β(VGS - VT)2 (แตกต่างจาก DMOSFET และ JFET) β คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของ EMOSFET ถ้าเราทราบว่า VT และ ID(ON) และ VGS(ON) ก็จะทราบค่า C ได้ ID (ON) และ VGS(ON) คือ ค่า ID และ VGS ค่าหนึ่งบนกราฟลักษณะสมบัติการโอนย้าย สำหรับลักษณะ ด้านเดรน การที่จะทำให้ EMOSFET ทำงานย่านอิ่มตัวนั้นจะต้องทำให้ VDS VDS(SAT) ซึ่ง VDS(SAT) = VGS - VT

2.2.2 EMOSFET P - Channel



รูปที่ 3.15 โครงสร้าง สัญลักษณ์และวงจรพื้นฐาน



รูปที่ 3.16 กราฟลักษณะสมบัติการโอนย้ายและกราฟลักษณะ

หลักการทำงาน

จะมีหลักการทำงานเหมือนกับ EMOSFET N – Channel โดย VGS มีค่าเป็นลบ (จะทำให้เกิด Induced P – Channel ได้) และ VDS มีค่าเป็นลบ สมการต่าง ๆ ก็ใช้เหมือนกันทุกประการ

MOSFET

มอสเฟต (อังกฤษ: metal–oxide–semiconductor field-effect transistor: MOSFET) เป็นทรานซิสเตอร์ ที่ใช้อิทธิพลสนามไฟฟ้าในการควบคุมสัญญาณไฟฟ้า โดยใช้ออกไซด์ของโลหะในการทำส่วน GATE นิยมใช้ในวงจรดิจิตอล โดยนำไปสร้างลอจิกเกตต่างๆเพราะมีขนาดเล็ก

โครงสร้างของ MOSFET

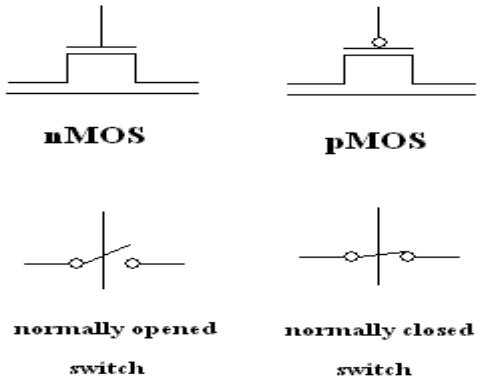
MOSFET ประกอบด้วยสามส่วน คือ

- GATE เป็นส่วนที่ทำมาจากออกไซด์ของโลหะ โดยสร้างให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างแผ่นสองแผ่นเพื่อ สร้างสนามไฟฟ้าเพื่อควบคุมการเข้าออกของสัญญาณไฟฟ้า
- SORCE เป็นส่วนขาเข้าของสัญญาณ
- DRAIN เป็นส่วนขาออกของสัญญาณ

ประเภทของ MOSFET

- N MOS (negative MOSFET) เป็นทรานซิสเตอร์ประเภท NPN เมื่อมีความต่างศักย์เป็นบวก (สนามไฟฟ้าแรง) สัญญาณไฟฟ้าจึงจะไหลจาก sorce ไป drain ได้
- P MOS (positive MOSFET) เป็นทรานซิสเตอร์ประเภท PNP เมื่อมีความต่างศักย์ต่ำหรือเป็นลบ (สนามไฟฟ้าอ่อน) สัญญาณไฟฟ้าจึงจะไหลจาก sorce ไป drain ได้

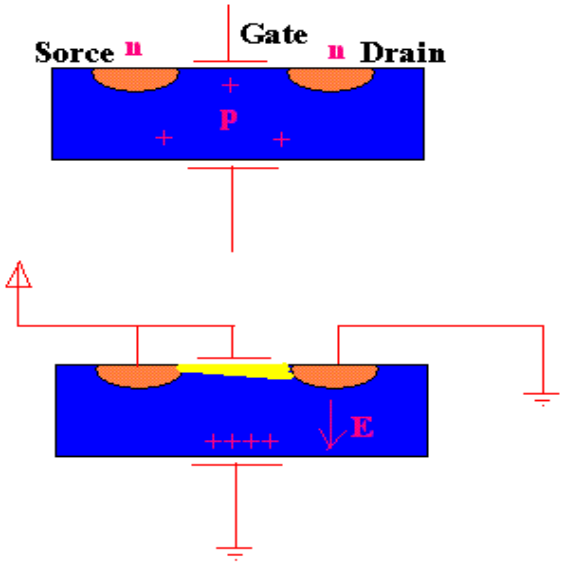
สัญลักษณ์ในทางดิจิตอล



MOSFET ในทางดิจิตอลถูกมองว่าเป็นสวิตซ์ โดย nMOS จะเป็นสวิตซ์ที่เมื่อสัญญาณเข้าเป็น "1" สวิตซ์ก็จะปิด ถ้าไม่สวิตซ์ก็ยังเปิดอยู่ (normal opened switch) ส่วน pMOS จะเป็นสวิตซ์ที่เมื่อสัญญาณเข้าเป็น "1" สวิตซ์ก็จะเปิด ถ้าไม่สวิตซ์ก็จะปิดอยู่ (normal closed switch) และสัญลักษณ์ทั่วไปจะมีสามขา ขากลางเป็น gate ส่วนอีกสองขาคือ sorce และ drain โดยใช้ใน nMOS เป็นหลักเพื่อสื่อสัญลักษณ์เดียวกับทรานซิสเตอร์ทั่วไปคือ ไฟขา base ไหล ขา Collector จะต่อกับ Emittor ส่วน pMOS ก็จะใส่ bubble ที่ขา gate

การทำงานของ MOSFET

- nMOS เมื่อปล่อยความต่างศักย์สูง จะเกิดสนามไฟฟ้าในทิศลงอย่างแรง โฮลใน p-type จะถูกผลักลงมาอยู่ด้านล่าง (ตามรูปที่ประกอบข้างบน) ประกอบกับมีอิเล็กตรอนอิสระบางส่วนถูกดูดขึ้นไปด้านบน ส่งผลให้บริเวณด้านบนมีอิเล็กตรอนอิสระมากจนเป็น n-type ได้เรียกว่า channel สัญญาณไฟฟ้าก็จะไหลผ่านช่วง channel นี้ซึ่งเป็น n-type เหมือนกับ drain และ sorce ได้โดยใช้อิเล็กตรอนอิสระเป็นพาหะ
- pMOS จะทำงานกลับกับ nMOS โดยเมื่อปล่อยความต่างศักย์ต่ำ (โดยมากมักจะติดลบ) จะเกิดสนามไฟฟ้าในทิศขึ้นอย่างแรง อิเล็กตรอนอิสระใน n-type จะถูกผลักลงมาอยู่ด้านล่าง ประกอบกับมีโฮลบางส่วนถูกดูดขึ้นไปด้านบน ส่งผลให้บริเวณด้านบนมีโฮลมากจนเป็น
- p-type ได้เรียกว่า channel สัญญาณไฟฟ้าก็จะไหลผ่านช่วง channel นี้ซึ่งเป็น p-type เหมือนกับ drain และ sorce ได้โดยใช้โฮลเป็นพาหะ



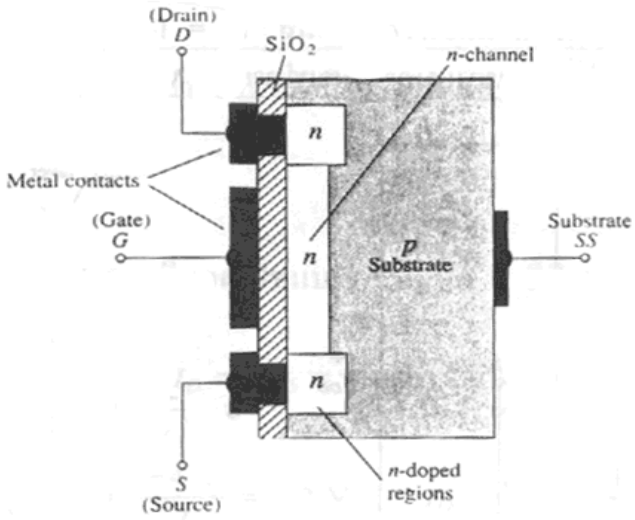
มอสเฟท (MOSFET)

มอสเฟทจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ดี พลีชั่น (Depletion) และ เอนชานซ์เมนต์ (Enhancement) แต่ละประเภทยังแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบแชนแนล n และ แบบแชนแนล p มอสเฟทประเภท ดีพลีชั่นหรือดีมอสเฟท (D-MOSFET) ทั้ง 2 แบบจะทำงานได้ 2 โหมด คือ โหมด (Depletion Mode) และ โหมดเอนฮานเมนต์ (Enhancement Mode) กล่าวคือ ถ้าจ่ายแรงดันลบให้กับดีมอสเฟทแชนแนล n จะทำงานในโหมดดีพลีชั่น แต่ถ้าจ่ายแรงดันบวกจะทำงานในโหมดเอนชานซ์เมนต์ ส่วนดีมอสเฟทแชนแนล p ก็จะทำงานคล้ายกันเมื่อ ได้รับแรงดันที่มีขั้วตรงข้ามกับแบบแชนแนล n

มอสเฟทประเภทเอนชานซ์เมนต์หรืออีมอสเฟท (E-MOSFET)มีโครงสร้างบางอย่างคล้ายกับมอสเฟทแบบดีพลีชั่น แต่จะทำงานได้เฉพาะโหมดเอนชานซ์เมนต์เท่านั้น

ดีมอสเฟทแบบแชนแนล n

โครงสร้างของดีมอสเฟทแบบแชนแนล n เป็นดังรูป



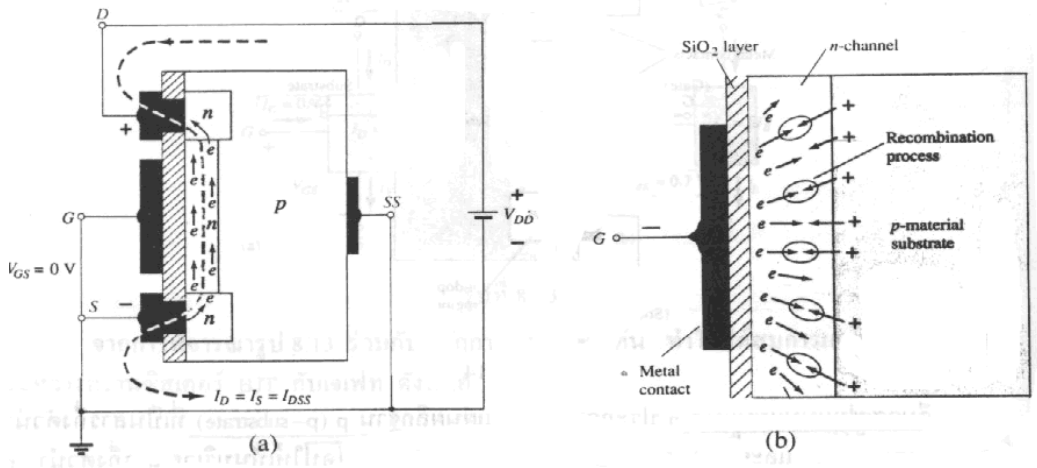
ดีมอสเฟทแบบแชนแนล n ประกอบขึ้นจากแผ่นผลักฐาน p (p-substrate) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำทำจากซิลิกอนขั้ว D และขั้ว S ต่อกับบริเวณที่มีการกระตุ้นหรือโดยให้เป็นบริเวณสารกึ่ง

ตัวนำ n (n-doped region) ทั้งสองส่วนนี้จะเชื่อมกับแชนแนล n สำหรับขั้ว G จะต่อกับวัสดุผิวนอกที่เป็นโลหะโดยมีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO2) กั้นแชนแนล n กับขั้ว G (ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นฉนวนประเภทไดรอิเลคทริค) เมื่อมีสนามไฟฟ้าจ่ายเข้ามาที่ชั้นของ SiO2 ก็จะสร้างสนามไฟฟ้าต้านและสร้างชั้นฉนวน
ขึ้นภายในตัวเองเพื่อกั้นขั้วเกทกับแชนแนล แสดงว่า ไม่มีการต่อโดยตรงระหว่างขั้ว G กับแชนแนลของมอสเฟท ขั้นที่เป็นฉนวน SiO2 จะทำให้ Zi มีค่าสูงตามความต้องการได้ นอกจากนี้บางครั้งจะต่อแผ่นผลึกจากฐานเข้ากับแหล่งจ่ายจึงมีขั้วเพิ่มขึ้นมา เรียกว่า ขั้วผลึกฐาน SS (Substrat : SS) ทำให้มี ขั้วเพิ่มเป็น 4 ขั้ว และจากข้างต้น จึงสรุปความหมายของคำว่า MOS ในชื่อมอสเฟท (ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าโลหะออกไซด์สารกึ่งตัวนำ) ได้ดังนี้

- โลหะ (Metal, M) หมายถึง บริเวณสำหรับการต่อขั้ว D, S และ G กับวัสดุผิวนอก
- ออกไซด์ (Oxide, O) หมายถึง ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO2)
- สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor, S) หมายถึง โครงสร้างพื้นฐานในบริเวณแพร่กระจายของสารกึ่งตัวนำชนิด p และสารกึ่ง ตัวนำชนิด n

การทำงานและคุณสมบัติเบื้องต้น (Basic Operation and Characteristics)

กำหนดให้ VGS ในรูป (a) มีค่าเป็นศูนย์ แล้วจ่าย VD ที่ขั้ว D และ S ขั้ว D สามารถดึงดูดอิเล็กตรอนอิสระ (e) ผ่านแชนแนลn
และทำให้กระแส ID = IS = IDSS ไหลผ่านแชนแนล n ได้ (คล้ายกับการไหลของกระแสไฟฟ้าในแชนแนลของเจเฟสขณะ VGS = 0 V)



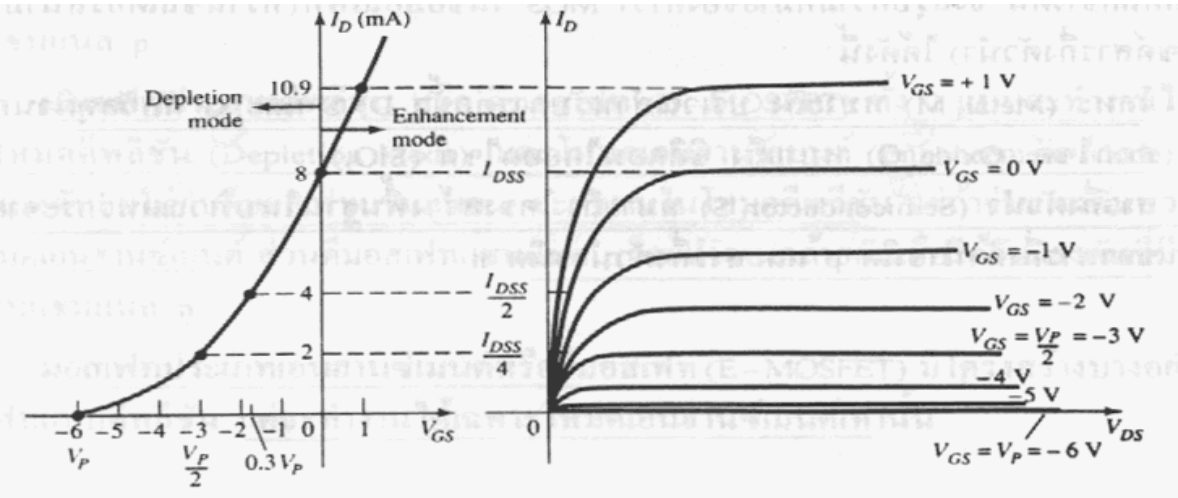
ถ้าจ่าย VGS ที่มีค่าเป็นลบให้กับขั้วเกท (รูป b) เช่น -1 V ความต่างศักย์ที่ขั้วเกทจะผลักดันให้อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนไปยัง

แผ่นผลึกฐาน p และดึงดูดโลหะจากแผ่นผลึกฐาน p ทำให้อิเล็กตรอนและโลหะรวมตัวกันใหม่ (Recombination Process) จึงเกิดการลดจำนวน

อิเล็กตรอนอิสระในแชนแนล n ที่มีไว้สำหรับการนำกระแส เมื่อมีค่า VGS เป็นลบมากเท่าใดก็จะเกิดการรวมตัวกันใหม่มากขึ้นเท่านั้นและ

อิเล็กตรอนอิสระที่แชนแนล n ก็จะมีจำนวนลดลง จึงกล่าวได้ว่าถ้า VGS เป็นลบมากขึ้น ID จะมีค่าน้อยลง เขียนเป็นคุณลักษณะได้

ดังรูปต่อไปนี้ การทำงานขณะ VGS เป็นลบนี้ เราเรียกว่า การทำงานในโหมดดีพลีชั่น



ถ้าจ่าย VGS ที่มีค่าเป็นบวกให้กับขั้วเกทความต่างศักย์ที่ขั้วเกทจะดึงดูดอิเลคตรอนจาก ผลึกฐาน p มายังบริเวณชั้น SiO2 ทำให้

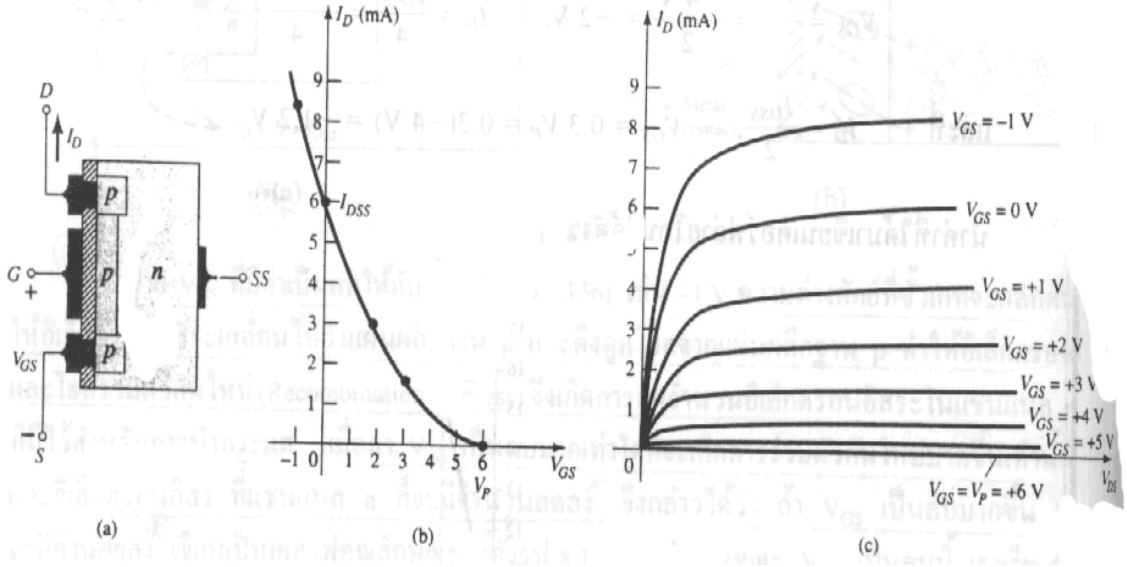
พาหะนำกระแสและสภาพนำกระแสของแชนแนลเพิ่มขึ้น ดังนั้นกระแส ID จึงเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่า IDSS การทำงานขณะ VGS

เป็นบวกนี้เราเรียกว่า การทำงานในโหมดเอนโานซ์เมนต์

ดีมอสเฟทแบบ แชนแนล p

โครงสร้างของดีมอสเฟทแบบแชนแนล p มีลักษณะตรงข้ามกับรูปของดีมอสเฟทแบบแชนแนล n คือประกอบด้วยแผ่นผลึก

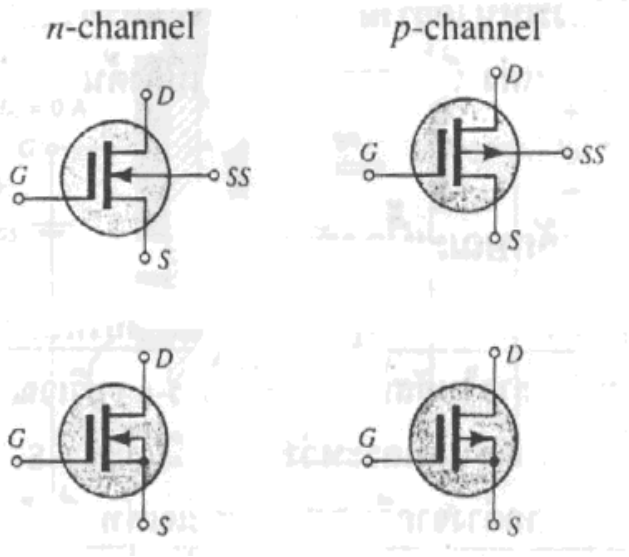
ฐาน n และแชนแนล p ดังรูป



จากการเปรียบเทียบคุณลักษณะของดีมอสเฟทแบบแชนแนล กับดีมอสเฟทแบบแชนแนล p (ตามรูป b และ c) เราพบว่า ทิศทางของกระแสขั้วแรงดันต่าง ๆ กลับกันทำให้คุณลักษณะกลับกันด้วย ID จะเริ่มเพิ่มขึ้นจากจุด Cutoff ที่ VGS = Vp และขณะที่ VGS มี ค่าเป็นบวกลดลง ID จะเพิ่มขึ้นจนถึง IGSS และเพิ่มอย่างต่อเนื่องจนเลยค่า IGSS เมื่อ VGS มีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้น ยังคงใช้สมการของชอคเล่ย์ ได้แต่ ควรระวังเครื่องหมาย VGS และ Vp ในสมการให้ถูกต้อง (คือจะต้องมีเครื่องหมายเป็นบวก)

สัญลักษณ์ (Symbols)

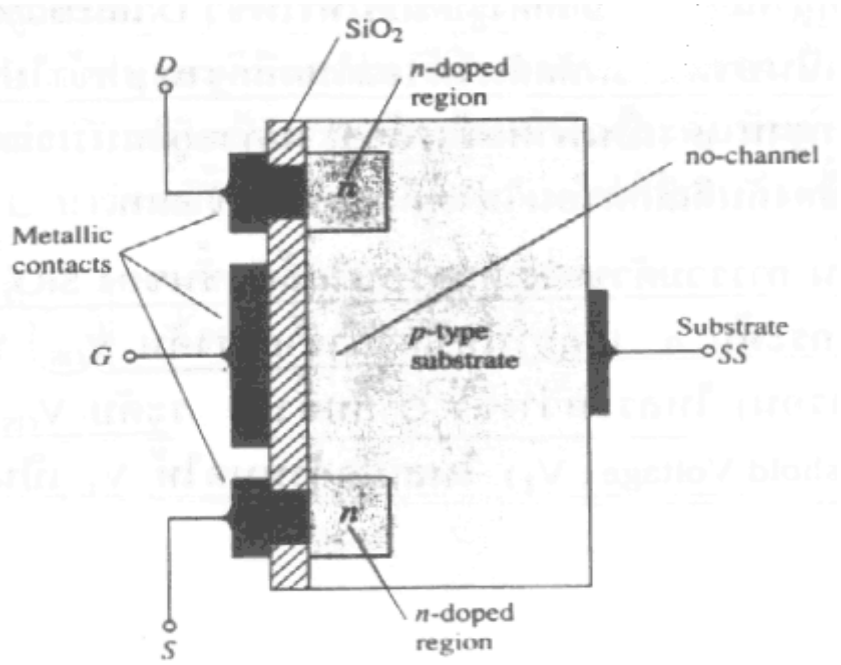
สัญลักษณ์ของดีมอสเฟทแบบแชนแนล n และ p เป็นดังรูป



ถ้าสังเกตุให้ดีจะเห็นว่า สัญลักษณ์สื่อความหมายถึงโครงสร้างแท้จริงของอุปกรณ์ ช่องว่างระหว่างขั้ว G กับขั้ว D (ที่ต่อกับขั้ว S) แสดงว่าไม่มีการต่อกันโดยตรงระหว่างขั้วทั้งสาม เนื่องจากมีฉนวนกันที่ขั้ว G ส่วนขั้วผลึกฐาน SS ในมอสเฟท บางครั้งมี บางครั้งไม่มี จึงเขียนสัญลักษณ์ได้ทั้ง 2 แบบ คือ กรณีที่มีขั้ว SS และในกรณีไม่มีขั้ว SS ในการวิเคราะห์ลำดับต่อไปมัก จะไม่มีขั้ว SS ดังนั้น สัญลักษณ์ที่อยู่ข้างล่างจะเป็นสัญลักษณ์ที่ใช้ทั่ว ๆ ไป

อีมอสเฟทแบบแชนแนล n

โครงสร้างเบื้องต้นของอีมอสเฟทแบบเชนแนล n เป็นดังรูป

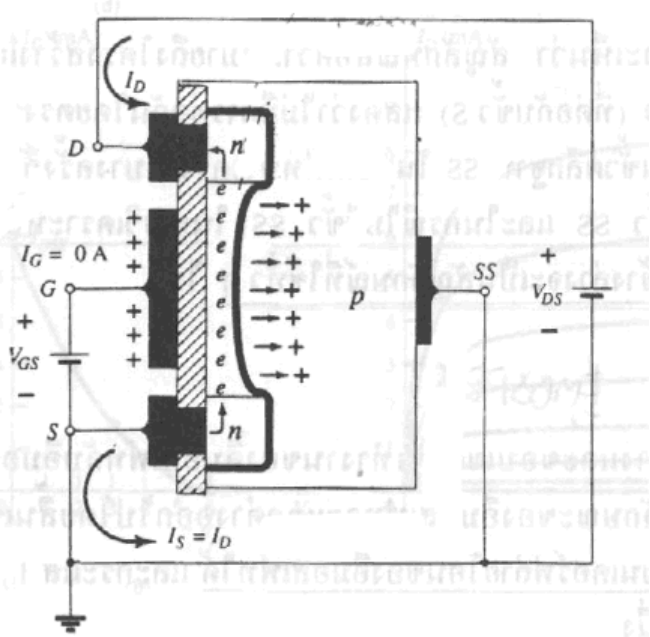


อีมอสเฟทแบบเชนแนล n ประกอบขึ้นจากแผ่นผลึกฐาน p ที่เป็นสารกึ่งตัวนำทำจากซิลิคอน ขั้ว D และขั้ว S ต่อกับ บริเวณที่มีการกระตุ้น n โดยผ่านวัสดุผิวนอกที่เป็นโลหะ นอกจากนี้บางครั้งจะต่อแผ่นผลึกฐาน p เข้ากับแหล่งจ่ายจึง มีขั้ว SS เพิ่มขึ้นมาคล้ายกับดีมอสเฟทถ้าสังเกตรูป ให้ดีจะเห็นได้ว่าไม่มีเส้นทางเชื่อมหรือไม่มีแชนแนล (no-channel) ระหว่างบริเวณที่มีการกระตุ้น n ทั้ง 2 แห่ง นี่คือความแตกต่างเบื้องต้นระหว่างโครงสร้างของอีมอสเฟทและดีมอสเฟท

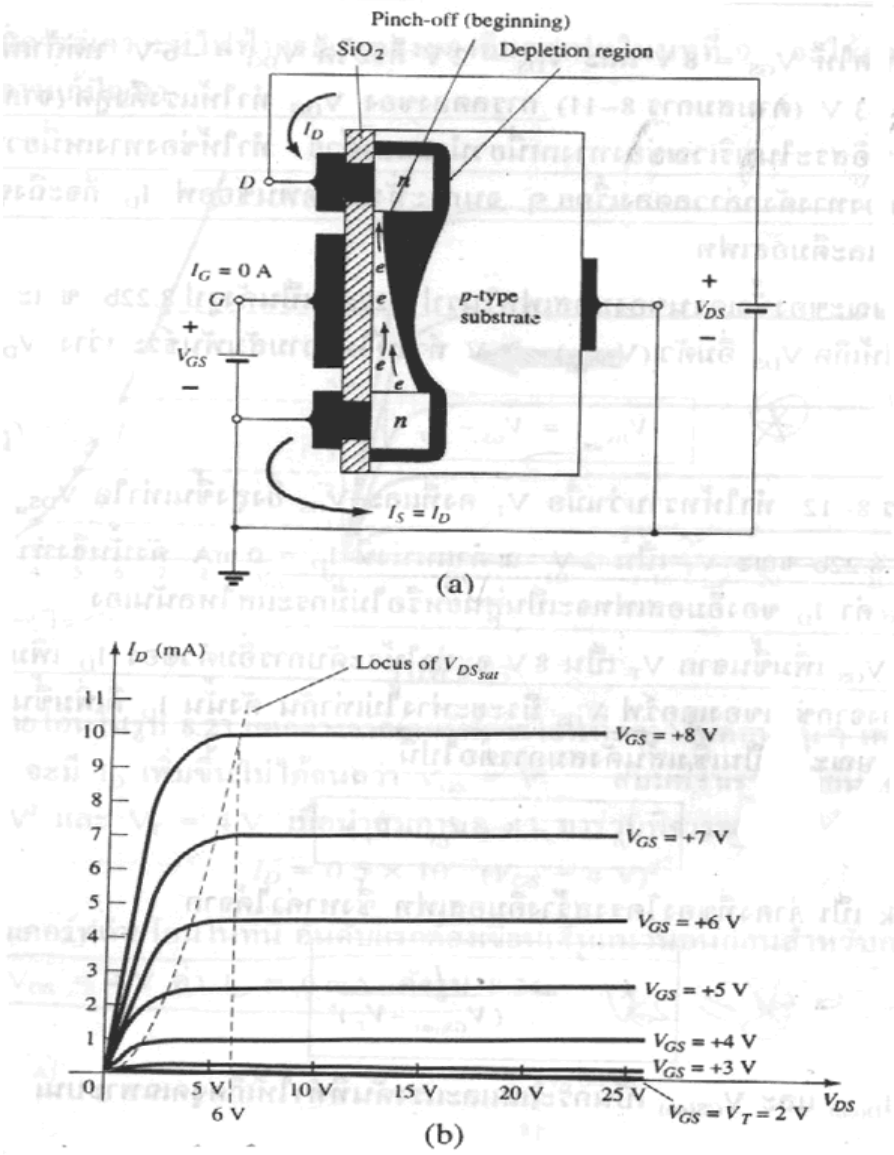
การทำงานและคุณลักษณะเบื้องต้น

กำหนดให้ VGS = 0V และจ่าย VDS ที่มีค่าเป็นบวกให้กับขั้ว S กับขั้ว D โดยขั้ว SS ต่อรวมกับขั้ว S ดังรูป จะเกิดจากไบอัสกลับที่รอยต่อ p-n (บริเวณที่มีการกระตุ้น n กับผลึกฐาน p) [เนื่องจากไม่มีเส้นทางเชื่อม หรือ แชนแนลระหว่างขั้ว D

และขั้ว S ทำให้เกิดการต้านการไหลของอิเล็กตรอน] กระแส ID=0 แตกต่างจาก ดีมอสเฟทและเจเฟทซึ่งมี ID=IDSS



ถ้าจ่าย VDS และVGS ที่มีค่าเป็นบวกดังรูป ทำให้ขั้ว D และขั้ว G มีความต่างศักย์เป็นบวกการที่ขั้ว G มีความต่างศักย์เป็น บวกนี้จะผลักดันให้โหละในผลึกฐาน p เข้าไปสู่บริเวณภายในผลึกฐาน p และดึงดูดอิเล็กตรอนในผลึกฐานp (เป็น พาหะข้างน้อยรวมตัว
อยู่ในบริเวณใกล้กับผิวของ SiO2) ซึ่งมีคุณลักษณะเป็นฉนวนและป้องกันอิเล็กตรอนไม่ให้ดึงดูด ไปยังขั้วเกท ขณะที่ VGS เพิ่มขึ้น การรวมตัวของอิเล็กตรอนใกล้กับชั้นของ SiO2 ก็เพิ่มมากขึ้นตามลำดับขณะเดียวกันบริเวณที่มีการ กระตุ้น n เกิดการเหนี่ยวนำจากแรงดัง VGS ทำให้มีอิเล็กตรอนหรือ ID (มีทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอน)ไหลระหว่าง ขั้ว D กับขั้ว S ระดับ VGS ทำให้ ID ไหลเราเรียกว่า แรงดันเรสโทลด์ (Threshold Voltage;VT) ในสเปคกำหนดให้ VT เป็น VGS(Th)



ถ้าเพิ่ม VGS ให้สูงขึ้น ID ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้า VGS มีค่าคงที่ และ เพิ่มค่า VDS จะทำให้ ID ถึงจุดอิ่มตัว (เช่น เดียวกับดีมอสเฟท) เนื่องจากขั้วบวกของ VDS ดึงดูดอิเล็กตรอน จึงจะทำให้ปลายของช่องทางเหนี่ยวนำบริเวณใกล้ขั้ว D แคบลง

ใกล้ [Pinch-Off (Beginning)] ดังรูป (a) เมื่อนำ KVL มาร่วมพิจารณา จะได้แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว D กับขั้ว G (VDG)

ดังนี้

VDG = VDS - VGS---------- สมการที่ 1

ถ้ากำหนดให้ VGS = 8 V และ VDS = 2 V ก็จะได้ VDG = -6 V แต่ถ้าเพิ่ม VGS เป็น 5 V ค่า VDG จะเป็น -3 V (ตาม สมการที่ 1) การลดลงของ VDG ทำให้แรงดึงดูด (จากขั้วบวกของ VDS) ที่มีต่ออิเล็กตรอนอิสระในบริเวณช่องทางเหนี่ยวนำลดลง
ด้วย ทำให้ช่องทางเหนี่ยวนำแคบลง ถ้าความกว้างของช่องทางดังกล่าวลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึง ID ก็จะถึงจุดอิ่มตัว ดังที่ได้อธิบายในดีมอสเฟท คุณลักษณะของขั้วเดรนของมอสเฟทใน รูป (a) เป็นดังรูป (b) ขณะ VT = 2 V ที่ VGS = 8 V ทำให้เกิด VDS อิ่มตัว (VDSsat) = 6 V ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง VDSsat กับ VGS ดังนี้

VDSsat = VGS - VT ---------- สมการที่ 2

สมการที่ 2 ทำให้ทราบว่า เมื่อ VT คงที่และ VGS ยิ่งสูงขึ้นเท่าใด VDSsat ก็ยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น ในรูป (b) ขณะที่ VT เป็น 2 V ณ ตำแหน่งนี้ ID = 0 mA ดังนั้นจึงทำให้ทราบว่า ถ้า VGS มีค่าต่ำกว่า VT ค่า ID ของ อีมอสเฟทจะเป็นศูนย์หรือไม่มีกระแสไหลนั่นเอง
ถ้าค่า VGS เพิ่มขึ้นจาก VT เป็น 8 V จะทำให้ระดับการอิ่มตัวของ ID เพิ่มขึ้นจาก 0 mA เป็น 10 mA แต่เนื่องจากช่วง ของ VGS มีระยะห่างไม่เท่ากัน ดังนั้น ID ที่เพิ่มขึ้น จึงมีความสัมพันธ์กับ VGS ในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นดังสมการต่อไปนี้

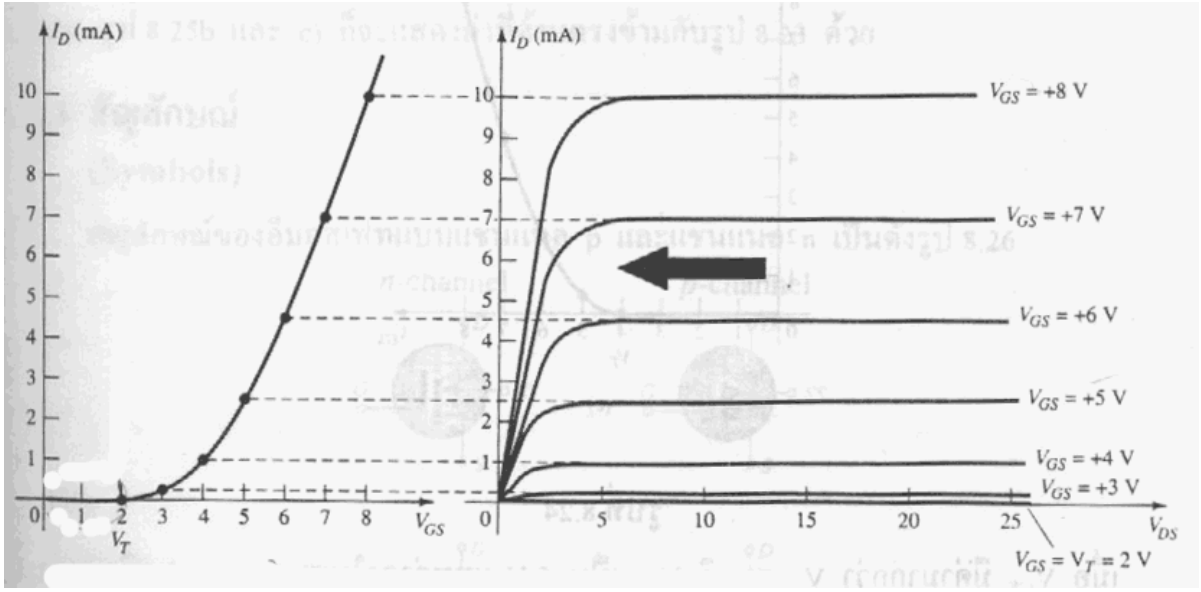
ID = k (VGS –VT) 2 ---------- สมการที่ 3

เมื่อ k เป็นค่าคงที่ของโครงสร้างอีมอสเฟท ซึ่งหาค่าได้จาก

k = ID (on) / (VGS (on) - VT)2 ----------สมการที่ 4

เมื่อ ID(on) และ VGS(on) เป็นกระแสและแรงดันที่ทำให้เกิดจุดเฉพาะคุณลักษณะของมอสเฟท สมมติแทนค่า ID(on) = 10 mA ขณะ VGS = 8 V ลงในสมการที่ 4 จะได้ k = 0.278 * 10-3 A/V2 แทนค่า k ในสมการที่ 3 เพื่อหาค่า ID สำหรับคุณลักษณะในรูป (b) โดยสมมติ VGS = 4

V จะได้ ID = 1.11 mA สำหรับการวิเคราะห์ไฟฟ้ากระแสตรงของอีมอสเฟท จะใช้คุณลักษณะถ่ายโอนดังรูปต่อไปนี้ในการแก้ปัญหา

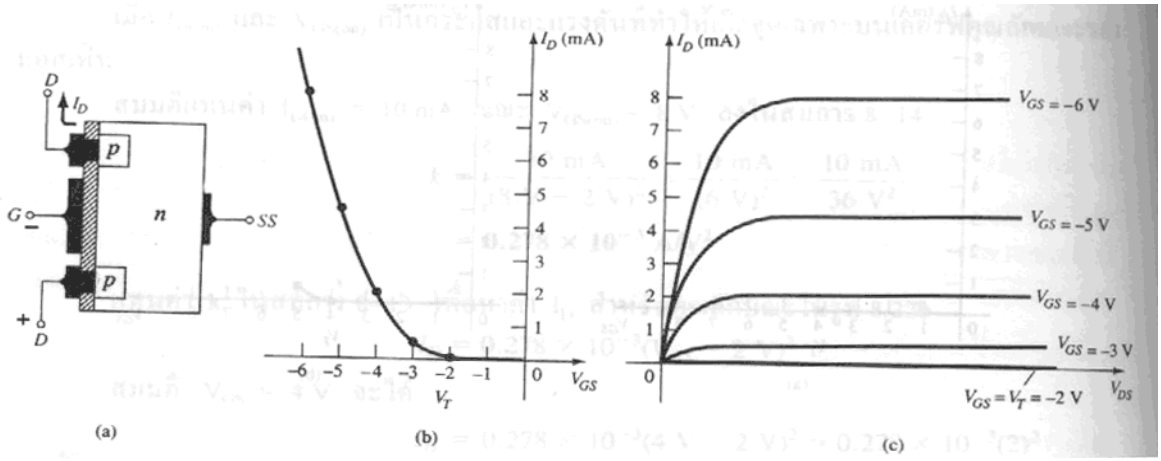


ภาพถ่ายโอนในรูป แตกต่างจากถ่ายโอนที่กล่าวในตอนต้น ๆ เพราะว่าอีมอสเฟทแบบแชนแนล n จะมี ID เพิ่มขึ้นไม่ได้จนกว่า VGS = VT สมมติว่าเราจะเขียนถ่ายโอนที่มี k = 0.5*10-3 A/V2 และ VT = 4 V เมื่อนำสมการที่ 3 มาร่วม

พิจารณา จะได้ ID = 0.5*10-3(VGS - 4 V)2

อีมอสเฟทแบบแชนแนล p

โครงสร้างของอีมอสเฟทแบบแชนแนล p มีลักษณะตรงข้ามกับแบบแชนแนล p

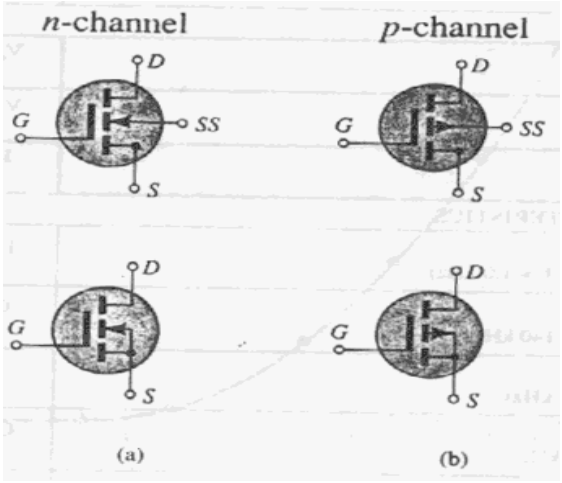


กล่าวคือ ขั้ว D และขั้ว S ต่อกับผลึกฐาน n และบริเวณที่มีการกระตุ้น p(p-doped regions) แต่ขั้วของแรงดันและทิศทาง

กระแสตรงข้ามกับแบบแชนแนล n นอกจากนี้คุณลักษณะของเคอร์ฟถ่ายโอน ก็จะแสดงค่าที่ด้านตรงข้าม

สัญลักษณ์ (Symbol)

สัญลักษณ์ของอีมอสเฟทแบบแชนแนล p และแชนแนล n เป็นดังรูป



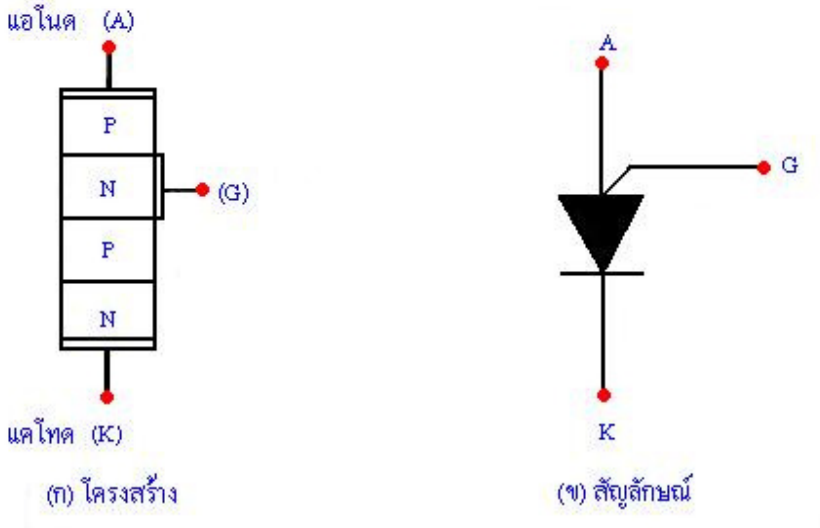
จะเห็นได้ว่าสัญลักษณ์แสดงโครงสร้างแท้จริงของอุปกรณ์เส้นประเชื่อมระหว่าง ขั้ว D กับ ขั้ว S แสดงว่าไม่มี
แชนแนลระหว่างขั้วทั้งสอง (ขณะไม่ได้รับการไบอัส) ซึ่งเป็นความแตกต่างประการเดียว
ระหว่างสัญลักษณ์ของดีมอสเฟทกับอีมอสเฟท

พียูที (PUT)

โปรแกรมเมเบิลยูนิจังชั่นทรานซีสเตอร์ (PROGRAMMABLE UNIJUNCTION TRANSISTOR) หรือย่อ ๆ ว่า พียูที (PUT) เป็นอุปกรณ์จำพวกสารกึ่งตัวนำที่จัดอยู่ในกลุ่มของโทริสเตอร์ PUT มีคุณสมบัติที่ดีกว่า UJT หลายอย่างตามชื่อของตัวมันคือ สามารถโปรแกรมและกำหนดค่าได้

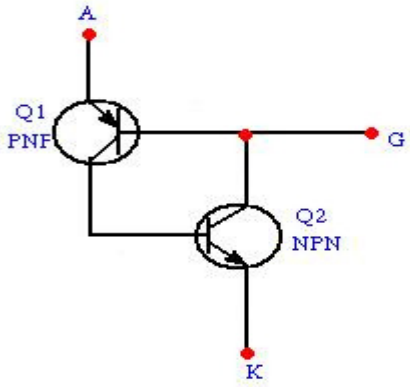
โครงสร้างและสัญลักษณ์ ของพียูที

PUT เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด 4 ตอน PNPN มีโครงสร้างเบื้องต้นเหมือนกับ SCR มีขาต่อออกมาใช้งาน 3 ขา คือ สารชนิด P ตอนนอกเป็นขาแอโนด (A) สารชนิด N ตอนนอกเป็นขาแคโถด (K) และสารชนิด N ตอนในเป็นขาเกท (G) โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ PUT แสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์ของ PUT

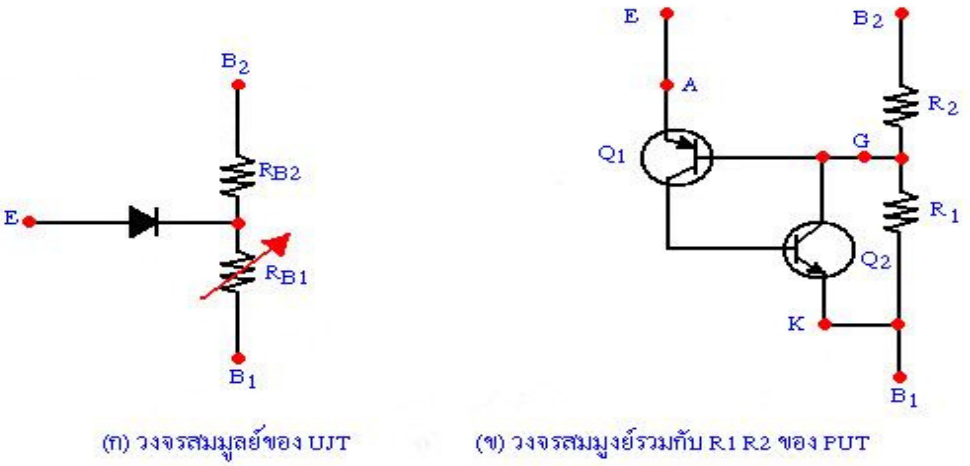
นอกจากโครงสร้างและ สัญลักษณ์จะคล้ายกัน SCR แล้ว PUT ยังมีวงจรสมมูลย์ที่เขียนออกมาได้คล้ายกับ SCR แตกต่างเพียงขา G ถูกต่อออกจากขา B ของทรานซีสเตอร์ PNP



รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลย์ของ PUT

ถึงแม้ว่าทั้งโครงสร้าง สัญลักษณ์ และวงจรสมมูลย์ จะคล้ายกับ SCR แต่หลักการทำงานและหลักการใช้งานจะเหมือนกับ UJT โดยนำไปใช้ในวงจรรีแลกเชชั่นออสซิลเลเตอร์ได้เหมือนกับ UJT และมีข้อดีกว่า UJT ตรงที่สามารถกำหนดอินทริซิก สแตนออฟ เรโซ (n) ได้จากแรงดันภายนอกจากตัวต้านทาน หรือจากวงจรตัวต้านทาน

เปรียบเทียบวงจรทำงานของ พีซียูทีและยูเจที



รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบวงจรคล้ายกันระหว่าง UJT กับ PUT

จากรูปที่ 5.3 เป็นการเปรียบเทียบวงจรคล้ายคลึงกันระหว่าง UJT กับ PUT ในวงจรรูปที่ 5.3 (ก) เป็นวงจรสมมูลย์ของ UJT ประกอบด้วย RB1, RB2 เป็นความต้านทานภายในตัว UJT และไดโอดที่เกิดขึ้นตรงรอยต่อ PN ส่วนวงจรรูปที่ 5.3 (ข) ทรานซีสเตอร์ Q1, Q2 ต่อวงจรตามรูป มีขาออกมา 3 ขา คือ ขา A, ขา K, และขา G เป็นวงจรสมมูลย์ของ PUT และต่อ R1, R2 เพิ่มเข้าไปเพื่อให้ PUT มีคุณสมบัติในการทำงานเหมือน UJT โดยเขียนขาออกมา 3 ขา โดยเทียบแต่ละขาได้เหมือนของ UJT เมื่อ UJT ทำงานความต้านทานของ RB1 จะลดลงอย่างรวดเร็ว โนทำนองเดียวกันเมื่อ PUT นำกระแสค่าความต้านทานระหว่างขา C และขาE ของ Q2 จะลดค่าต่ำลงจนเกือบลัดวงจร ทำให้ค่าความต้านทาน R1 ที่ต่อขนานอยู่มีผลไปด้วยคุณสมบัติตัวหนึ่งของ UJT ที่สำคัญคือค่า n เป็นค่าที่ถูกกำหนดจากค่าความต้านทาน RB1 และ RB2 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

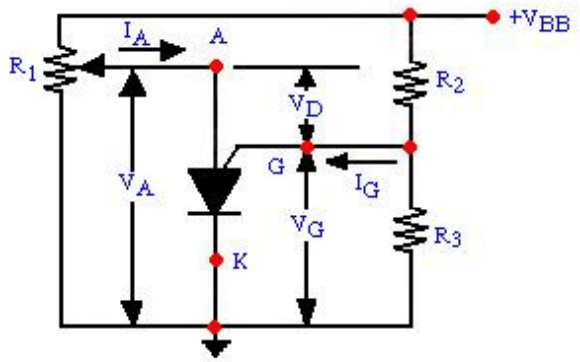
$$n = RB1/RB1+RB2 \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(5.1)$$

ค่า n นี้จะถูกกำหนดในรายละเอียดของ UJT แต่ละเบอร์ จะมีค่าอยู่ในย่านหนึ่ง เช่น 0.56~0.75 หรือ 0.7 ~0.85 ค่าเหล่านี้เป็นค่าที่ถูกกำหนดมาไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนั้นค่า RBB เป็นค่าที่ได้จากผลบวกของ RB1+RB2 ก็จะถูกนำมาในย่านหนึ่ง เช่น 4.7KeV~9.1KV ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ถ้าเป็นตัว PUT เราสามารถควบคุมค่า RBB และn ได้ในช่วงที่ต้องการโดยการกำหนดค่า R1 และ R2 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$RBB = R1+R2 \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(5.2)$$

$$n= R1/R1+R2 \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (5.3)$$

จากสมการดังกล่าวทำให้ค่า RBB และ n เป็นค่าที่สามารถควบคุมและกำหนดได้จากผู้ใช้ ช่วยทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพมากขึ้นการจ่ายไบอัสให้ PUT ทำงาน



รูปที่ 5.4 วงจร PUT จริงที่ต่อใช้งาน

จากรูปที่ 5.4 เป็นวงจร PUT จริง ที่ต่อใช้งาน คือ R1 ปรับเปลี่ยนค่าได้เพื่อจ่ายไบอัสให้ขา A มีศักย์ตกคร่อม PUT เป็น VA และ R2, R3 เป็นวงจรแบ่งแรงดันจ่ายไบอัสให้ขา G มีศักย์ตกคร่อมขา G เป็น VG สามารถหาค่าแรงดันตกคร่อม VG ในขณะกระแสเกท (IG) = 0 ได้ดังนี้

VG = (R3/R2+R3)VBB

VG = nVBB ……(5.4)

เมื่อ n = R3/R2+R3 ...……(5.5)

แรงดันที่ตกคร่อมขา A กับขา K หาได้จากสมการดังนี้

VA = VD+VG ……(5.6)

นั่นคือค่าแรงดันสูงสุดที่จะมีผล ทำให้ PUT ทำงาน หาได้จากสมการดังนี้

VP = VD+VG

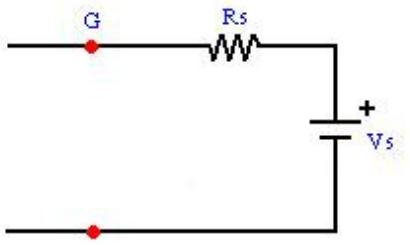
เมื่อ VD = แรงดันตรงรอยต่อของไดโอด Si มีค่าประมาณ 0.7V

VG = nVBB

VP = 0.7+nVBB ……..…(5.7)

หรือ VP = 0.7+VG

สมการต่าง ๆ กี่กล่าวมาจะคล้ายกับสมการของ UJT ในบทที่ 4 เนื่องจากคุณสมบัติในการทำงานของ PUT คล้ายกับคุณสมบัติของ UJT นั่นเอง



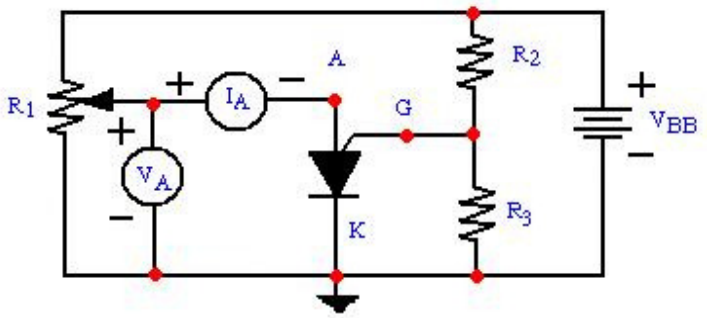
รูปที่ 5.5 วงจรสมบูรณ์มูลย์ของเทฟวีนินที่ขั้วต่อขา G ตามรูปที่ 5.4

จากรูปที่ 5.5 เป็นวงจรสมมูลย์ของเทฟวีนินที่ขั้วต่อขา G ตามรูปที่ 5.4 จะเขียนแทนผลรวมของ R2 และ R3 ด้วย RS และเขียนแทนแรงดันที่ตกคร่อมขา G (VG) ด้วยแรงดัน VS สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

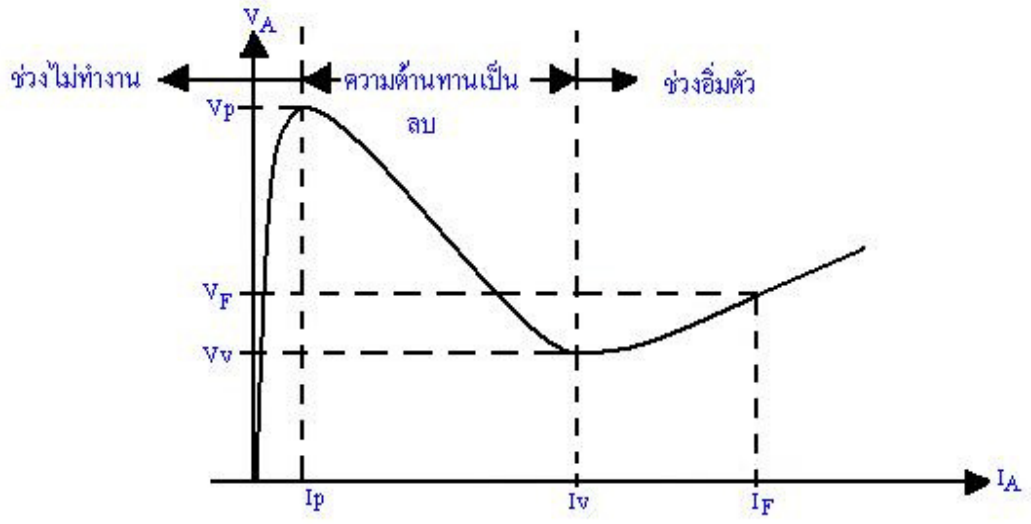
Rs = R2R3/R2+R3 ……..(5.8)

VS = nVBB ..……(5.9)

กร๊าฟคุณสมบัติของพียูที



รูปที่ 5.6 วงจรทดสอบเพื่อหากร๊าฟคุณสมบัติของ PUT



รูปที่ 5.7 กร๊าฟคุณสมบัติของ PUT แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง VA และ IA

จากรูปที่ 5.7 เป็นกร๊าฟคุณสมบัติ่ของ PUT แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง VA กับ IA จากกร๊าฟถูกแบ่งสภาวะการทำงานออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงไม่ทำงาน ช่วงความต้านทานเป็นลบ และช่วงทำงานอธิบายได้ดังนี้ กร๊าฟช่วงไม่ทำงาน เป็นกร๊าฟช่วงที่เริ่มจ่ายแรงดันให้ที่ขา A ค่อย ๆ

เพิ่มขึ้นจากค่าไปหาค่าสูง ในช่วงนี้ตัว PUT ยังไม่ทำงานความต้านทานระหว่างขา A และ ขา K สูง ทำให้มีค่ากระแสไหลผ่าน PUT ต่ำมาก มีเพียงกระแสรั่วซึมไหลผ่าน PUT เล็กน้อย ต้องเพิ่มแรงดัน VA ให้ PUT ถึงค่าแรงดัน VP

กร๊าฟช่วงความต้านทานเป็นลบ เป็นกร๊าฟช่วงที่จ่ายแรงดัน VA ให้ PUT ถึงค่าแรงดัน VP หรือ ค่าแรงดันที่ทำให้ PUT เริ่มทำงาน กระแสไหลผ่าน PUT ช่วงนี้เรียกว่ากระแส IP ค่าความต้านทานในตัว PUT เริ่มลดลง ทำให้มีกระแส IA ไหลผ่าน PUT มากยิ่งขึ้นเป็นลำดับ ค่าความต้านทานในตัว PUT จะลดลงจนถึงค่าต่ำสุด มีแรงดันตกคร่อม PUT เท่ากับ VV และมีกระแสไหลผ่านเท่ากับ IV ในช่วงนี้ยิ่งเพิ่มแรงดัน VA ให้ PUT จะยิ่งทำให้ PUT มีค่าความต้านทานในตัวลดลง มีเพียงกระแสไหลผ่านมากขึ้น

กร๊าฟช่วงทำงาน เป็นกร๊าฟช่วงที่ถือว่า PUT ทำงาน เริ่มจากจุดที่แรงดันตกคร่อม PUT เท่ากับ VV และกระแสไหลผ่าน PUT เท่ากับ IV หลังจากช่วงนี้เป็นต้นไปถ้ายิ่งเพิ่มแรงดัน VA ให้ PUT มากขึ้นอีก จะมีแรงดันตกคร่อม PUT เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย แต่ละกระแสไหลผ่าน PUT เพิ่มขึ้นอีก จนถึงค่าแรงดัน VF จะมีกระแสไหลผ่าน IF ซึ่งถือว่าเป็นช่วงอิ่มตัวของ PUT

รายละเอียดและขีดจำกัด ของ PUT

1. กระแสรั่วซึมจากการไบอัสกลังระหว่างเกทกับแอโนด (IGAO) เป็นค่ากระแสรั่วซึมที่ไหลจากขา G ไปยังขา A ของ PUT โดยไบอัสที่จ่ายเป็นไบอัสกลับ และขา K เปิดลอยไว้

2. กระแสรั่วซึมจากการไบอัสกลับระหว่างเกทกับแคโถด (IGKS) เป็นค่ากระแสรั่วซึมที่ไหลจากขา G ไปขา K ของ PUT โดยไบอัสที่จ่ายเป็นไบอัสกลับ ขณะที่ขา A ถูกซ้อนตกลงกราวนด์

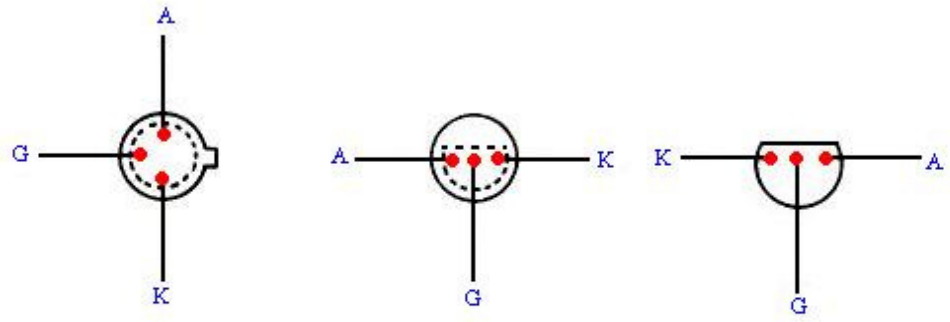
3. กระแสแอโนดที่จุดยอด (IP) เป็นกระแสแอโนดที่ทำให้ PUT เริ่มทำงาน สามารถที่จะควบคุมกระแส IP ได้โดยเลือกค่า RS ที่เหมาะสม

4. กระแสแอโนดที่จุดต่ำสุด (IV) เป็นค่าของกระแสแอโนดที่อยู่ระหว่างสภาวะช่วงความต้านทานเป็นลบ และสภาวะทำงาน สามารถที่จะควบคุมกระแส IV ได้เช่นเดียวกับค่า IP

5. แรงดันออฟเซท (VT) เป็นผลต่างของแรงดันที่แอโนดขณะกำลังเริ่มนำกระแสซึ่งเรียกว่า

VP กับแรงดันที่ขา G(VS)

6. แรงดันที่แอโนดและแคโถดช่วงทำงาน (VF) เป็นแรงดันในสภาวะที่ PUT ทำงานในช่วงอิ่มตัว



รูปที่ 5.8 ตำแหน่งขาต่าง ๆ ของ PUT

ข้อควรระวังในการใช้พียูที

1. แรงดันระหว่างขา A กับขา K ค่าสูงมีค่าประมาณ 6 40V

2. แรงดันไบอัสกลับที่ขา G กับขา A ค่าสูงสุด โดยจ่ายแรงดันตามรูปที่ 5.9 มีค่าประมาณ 40V

3. แรงดันระหว่างขา G กับขา K ค่าสูงสุด แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่แรงดันขา G มีศักย์เป็นบวก เทียบกับขา A มีค่าประมาณ+40V และส่วนที่แรงดันขา G มีศักย์เป็นลบเทียบกับขา A มีค่าประมาณ –50V โดยทั่วไปการจ่ายแรงดันที่ขา G กับขา K นี้ ไม่นิยมให้ขา G มีศักดิ์เป็นลบเมื่อเทียบกับขา K

4. กระแสแอโนดสูงสุด มักจะเป็นกระแส มีการไหลเป็นช่วงแบบไม่ต่อเนื่อง

5. กระแสแอโนดแบบต่อเนื่อง จะเป็นค่ากระแสแอโนดขณะไบอัสตรง โดยไหลผ่านตัว PUT แบบต่อเนื่อง มักจะบอกค่าสูงสุดไว้

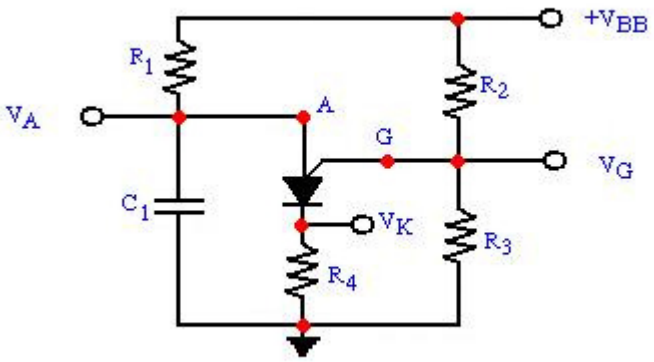
6. กระแสเกทแบบต่อเนื่อง มักจะบอกค่ากระแสเกทขณะไบอัสตรงค่าสูงสุดไว้โดยไหล

แบบต่อเนื่อง ที่ไม่ทำให้ PUT ชำรุดเสียหาย

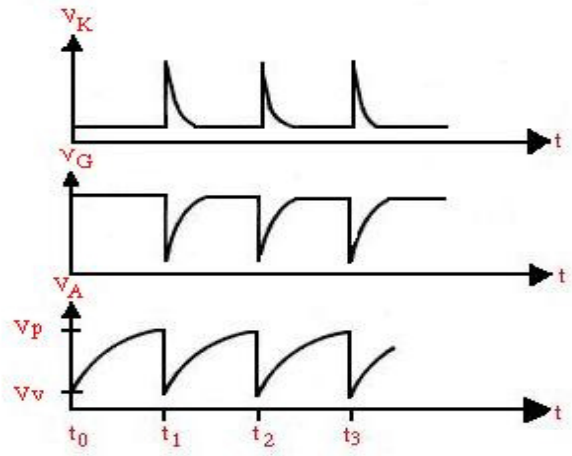
7. การสูญเสียกำลังงาน เป็นค่ากำลังงานที่สุญเสียไปของ PUT ในขณะที่ PUT ทำงาน

วงจรรีแลกเซชั่นออ สซิลเลเตอร์ใช้พียูที

วงจรรีแลกเซชั่นออสซิลเลเตอร์ เป็นวงจรกำเนิดความถี่รูปฟันเลื่อย และรูปพัลซ์



(ก) วงจรรีแลกเซชั่นออสซิลเลเตอร์ใช้ PUT



(ข) รูปสัญญาณที่จุดต่างๆของวงจรรีแลกเซชั่นออสซิลเลเตอร์

รูปที่ 5.9 วงจรและรูปสัญญาณของรีแลกเซชั่นออสซิลเลเตอร์

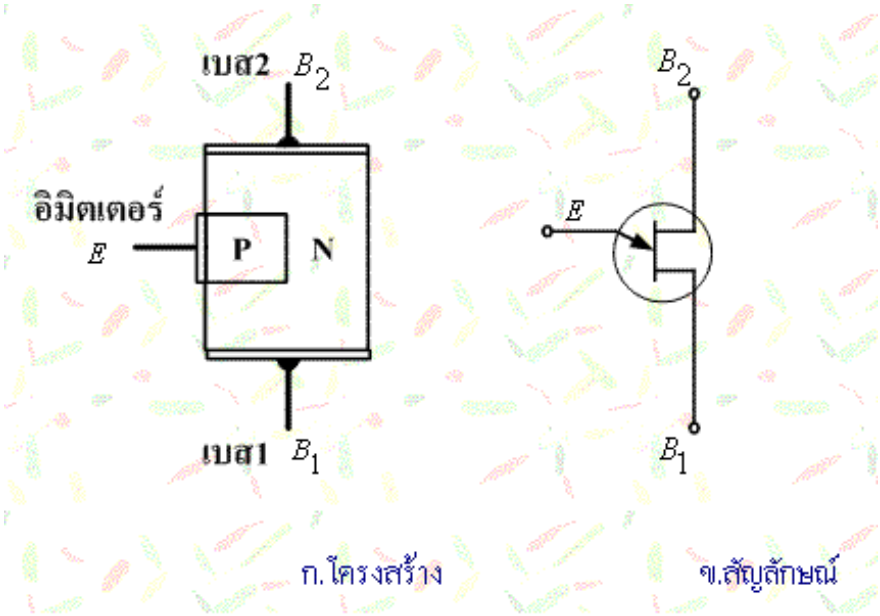
จากรูปที่ 5.9 (ก) เป็นวงจรรีแลกเซชั่นออสซิลเลเตอร์ โดยใช้ PUT เป็นตัวกำเนิดความถี่ R1 C1 เป็นวงจรกำหนดค่าเวลาคงที่ เพื่อจ่ายไบอัสตรงให้ขา A ทำให้ PUT ทำงาน R2 และ R3 เป็นวงจรแบ่งแรงดัน R3 เป็นไบอัสตรงให้ขา G R2 ทำหน้าที่จำกัดกระแสที่จะไหลผ่าน PUT เมื่อวงจรทำงานจะทำให้ได้สัญญาณออกเอาท์พุทที่จุดต่าง ๆ ตามรูปที่ 5.9 (ข) อธิบายได้ดังนี้เมื่อเริ่มจ่ายแรงดัน VBB เข้าวงจร จะมีแรงดันตกคร่อม R3 จ่ายเป็นแรงดัน VG ไบอัสให้ขา G ของ PUT ตัว PUT ยังไม่ทำงาน เนื่องจาก C1 ยังไม่ได้ประจุแรงดัน ทำให้ขา A ยังได้รับไบอัสกลับ ตัวเก็บประจุ C1 เริ่มประจุแรงดันไว้บนบวกล่างลบ ค่อย ๆ จ่ายศักย์บวกให้ขา A มากขึ้น จนกระทั่ง C1 ประจุแรงดันถึงค่าแรงดัน VG+VD หรือ VG+0.7V เป็นค่าแรงดันที่ขา A เริ่มได้รับไบอัสตรง PUT ทำงาน ทำให้ค่าความต้านทานระหว่างขา A กับขา K ลดลงอย่างรวดเร็ว C1 จะคายประจุผ่าน R4 แรงดันที่ประจุไว้ของ C1 ลดลง PUT จะนำกระแสจนกว่ามีกระแสไหลผ่านน้อยจนไม่สามารถนำกระแสได้ PUT จะหยุดนำกระแส C1 จะเริ่มประจุแรงดันใหม่อีกครั้ง การทำงานจะเป็นเช่นนี้ตลอดเวลา

ตัวต้าน ทาน R1 จะเป็นตัวกำหนดการประจุของ C1 ให้ช้าหรือเร็ว ค่าความต้านทาน R1 หาได้จากสมการดังนี้

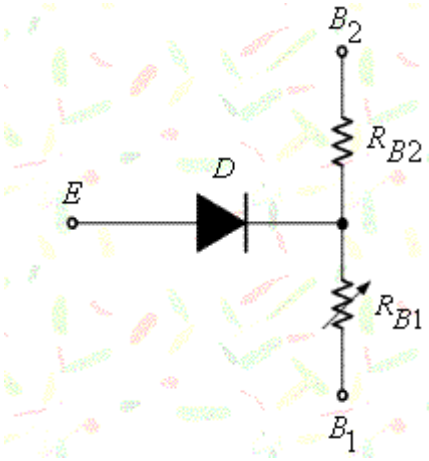
VBB-Vp/Ip>R1> VBB-Vv/Iv ……(5.10)

ยูเจที (UJT)

ยูเจที (UJT) ย่อมาจาก “ยู นิจังชั่น ทรานซิสเตอร์” (UNIJUNCTION TRANSISTOR) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N) แท่งหนึ่งแล้วทำการต่อขั้วเข้าที่ปลายของสารกึ่งตัวนำนั้น จากนั้นนำแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P) มาต่อให้เกิดรอยต่อที่บริเวณตรงกลางแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N) ค่อนไปทางบนเล็กน้อย ตรงรอยต่อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N) และสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P) จะเสมือนกับเป็นไดโอดตัวหนึ่งและต่อขาออกจากปลายทั้งสาม โดยขาที่ต่อออกจากสารกึ่งตัวนำชนิด P จะเป็นขาอิมิ ตเตอร์ (E) ส่วนขาที่ต่อออกจากแท่งสารกึ่งตัวนำชนิด N ที่ใกล้กับสารกึ่งตัวนำชนิด P เรียกว่าขาเบส2 (B2) และขาที่เหลือคือ ขาเบส1 (B1) การใช้งานจะเป็นตัวกำเนิดสัญญาณไปกระตุ้นเอสซีอาร์หรือไทรแอค

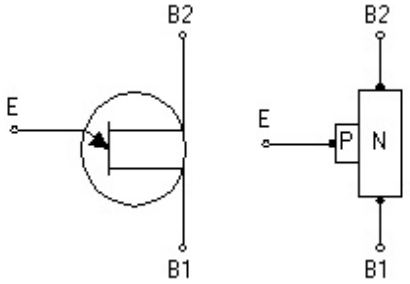


แสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์ของยูเจที

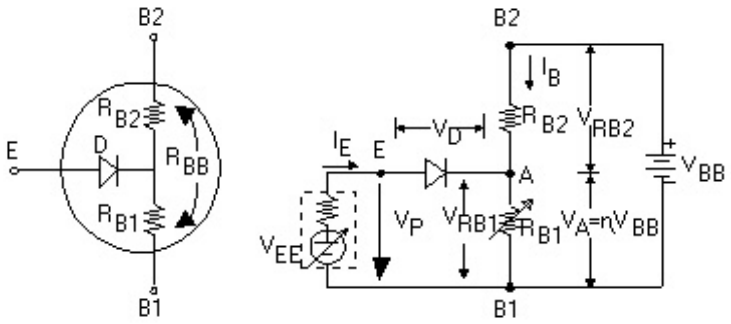


แสดงวงจรเทียบเท่าของยูเจที

UJT : เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กระตุ้น (Triger) ให้กับ SCR หรือ TRIAC และยังใช้งานในวงจรผลิตความถี่ (OSC) วงจรกำเนิดสัญญาณ ฟันเลื่อย วงจรควบคุมเฟส วงจรหน่วงเวลา



ก. สัญลักษณ์ UJT ข. โครงสร้างของ UJT



ค. วงจรสมมูลย์ ง. การไบอัส

การให้ BIAS B2 ให้มีศักดิ์ (+) เมื่อเทียบกับขา B1

มีกระแส IE ไหลหรือมี (VP = VD + VA) UJT จะทำงาน

ค่า RBB สภาพ OFF สูง ประมาณ 5K ถึง 10 KOhm ทำให้สูญเสียกำลังงานน้อย

มีกระแสทริกต่ำมากเพียง 2-10 uA

RBB : INTERBASE RESISTANCE

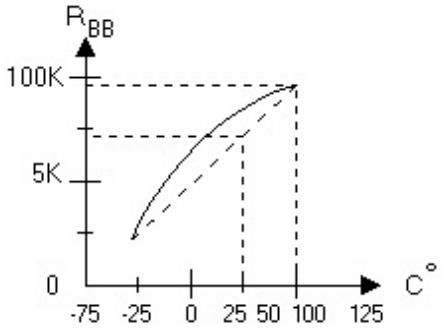
RBB = RB1 + RB2 .....(1)

RBB ~ 5K - 10KOhm

RB1 > RB2

RB1 : VARIABLE เปลี่ยนค่าได้ 5K ถึง 50 โอห์ม

RB2 : FIXED คงที่



* RBB เปลี่ยนค่าตามอุณหภูมิ อุณหภูมิสูงขึ้น RBB เพิ่มขึ้น ประมาณ 1% / ๐C

VBB = VB1 + VB2 .....(2)

INTRINSIC STAN-OFF RATIO

n = อิต้า (ETA)

n = RB1 / (RB1+RB2) = RB1 / (RBB .....(3)

IE = 0

VA = VRB1 = nVBB .....(4)

VA = nVBB = (RB1 x RBB) / RBB .....(5)

IE = 0

VP = VD + VA .....(6)

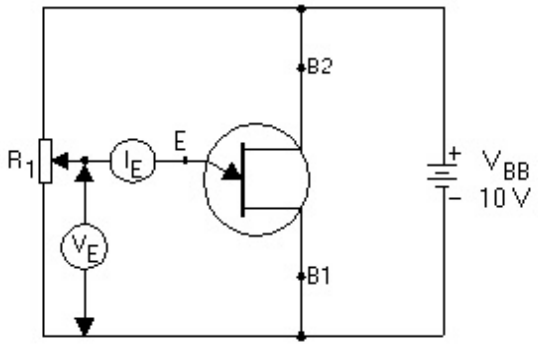
VP = VD +n VBB .....(7)

* VP เป็นแรงดันสูงสุดที่ทำให้ IE ไหล UJT ทำงาน

POWER DISSIPATION (การสูญเสียกำลังงาน)

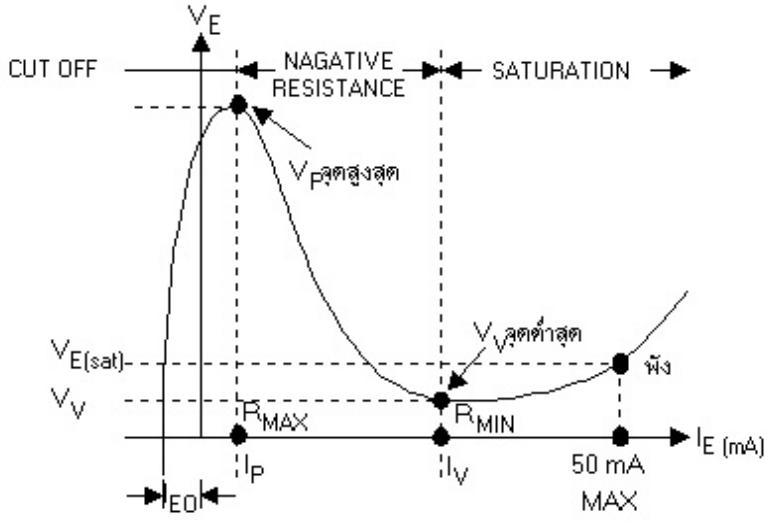
VP = (VBB)2 / RBB .....(8)

<u>คุณสมบัติ ของ UJT</u>



วงจร ทดสอบ

<u>CHARACTERISTIC OF UJT</u>



กราฟ แสดงความสัมพันธ์ V_E และ I_E

กำหนดให้

R_{BB} = ความต้านทาน ภายในของ UJT ระหว่างขา B_2 - B_1 ($R_{BB} = R_{B1} + R_{B2}$) ประมาณ 4K - 10Kohm

V_{BB} = แรงดันตกคร่อมขา B_2 และ B_1

n = อัตราส่วนอินทรินซิก สแตนออฟ อยู่ระหว่าง (0.5 - 0.75)

V_E - V_P = เป็นแรงดันป้อน ให้ขา E จนทำให้ DIODE ทำงาน ($V_P = V_D + V_A$)

V_D = เป็นแรงดันตกคร่อม DIODE ประมาณ 0.35 - 0.7 V ใน UJT

I_E = กระแสที่ขา E ของ UJT มีไม่เกิน 50 mA PEAK ประมาณ 2A

I_{E0} = ค่ากระแสไบอัสกลับที่ขา E จาก B_2 ไป E โดย B_1 เปิดวงจร

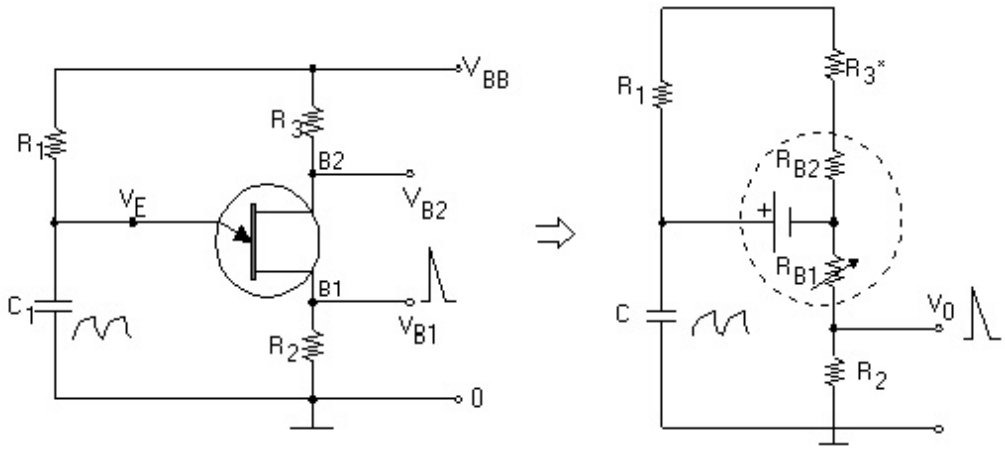
V_V = เป็นแรงดันต่ำสุด (VOLLAY POINT) ระหว่างขา E กับ B_1

I_V = คือค่ากระแสที่ไหลในขณะที่แรงดัน ขา E มีค่า V_V (4 - 6 mA) min ---->

I_P = คือค่ากระแสที่ขา E ในขณะแรงดันมีค่า V_P (0.4 - 5 uA)

การนำ UJT ไปใช้งาน

วงจร RELAXATION



R_3 : LOAD

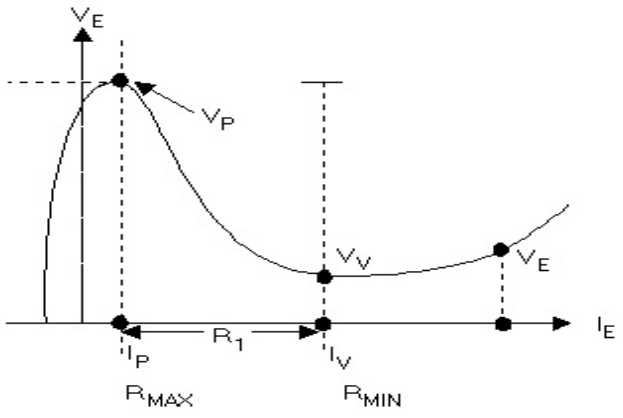
[$R_3 \simeq 0.28\ R_{BB} / nV_{BB}$] -------> ปกนิไม่นิยมต่อ R_3 ซึ่งทำให้ I ไหลน้อยลง

CURRENT LIMITER

$$[R_3 \simeq 0.015\ V_{BB}\ R_{BB}n]$$

$R_3 \simeq 0.7\ V_{RBB} / nV_{BB}$] : $R_3 << R_3$

หาค่า R_1 จากกราฟ



$[V_{R1} + V_E = V_{BB}]$

$I_{R1} \times R_1 = V_{BB} - V_E$

$R_{1(max)} = (V_{BB} - V_E) / I_{R1}$

$(V_{BB} - V_P) / I_P$

$R_{max} < (V_{BB} - V_P) / I_P$ .....(*)

AT THE VOLLAY POINT $I_E = I_V$ AND $V_E = V_V$

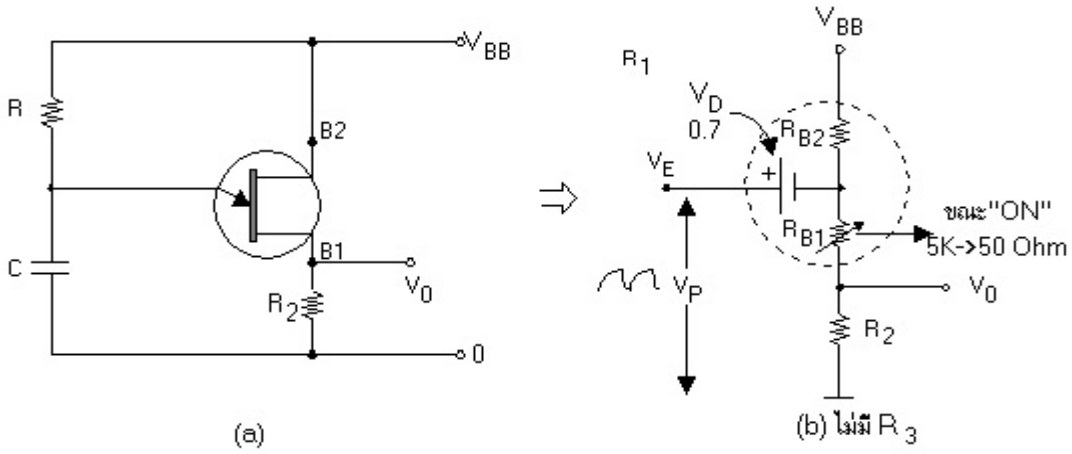
$V_{BB} = I_{R1}R_1 + V_E$ ---------- (1)

$V_{BB} = I_VR_1 + V_V$ ---------- (2)

$[R_{1(min)} = (V_{BB} - V_V) / I_V]$ ---------- (*)

$R_{1(min)} > (V_{BB} - V_V) / I_V$ ---------- (*)

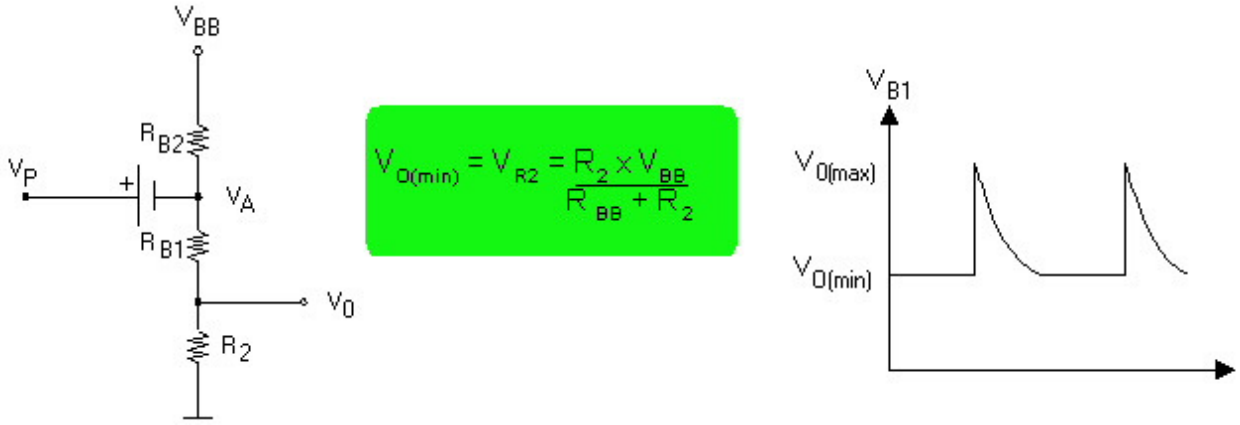
$V_{BB} - V_P) / I_P > R_1 > V_{BB} - V_V) / I_V$ ---------- (*)



$$V_P = V_D + [\{(R_{B1} / R_2)\, V_{BB}\} / (R_{BB} + R_2)])$$

$$V_P \simeq V_D + n\, V_{BB}$$

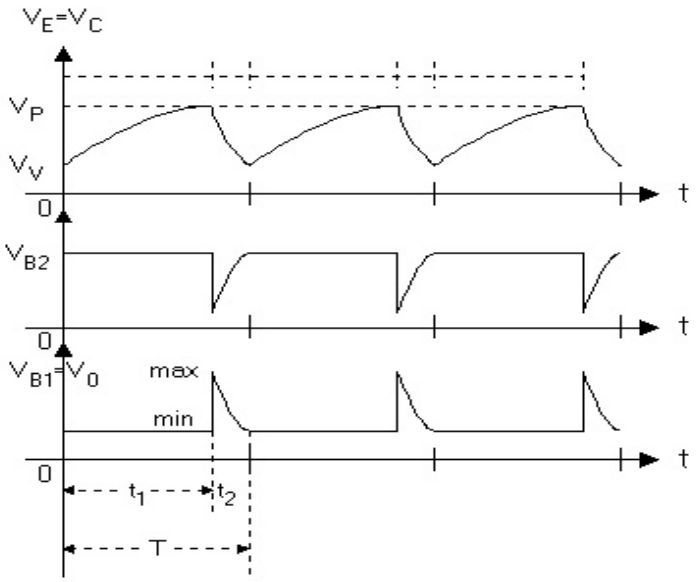
<u>V_0 ขณะ UJT "OFF"</u> (หาแรงดันจากการแบ่งแรงดัน DEVIDER)



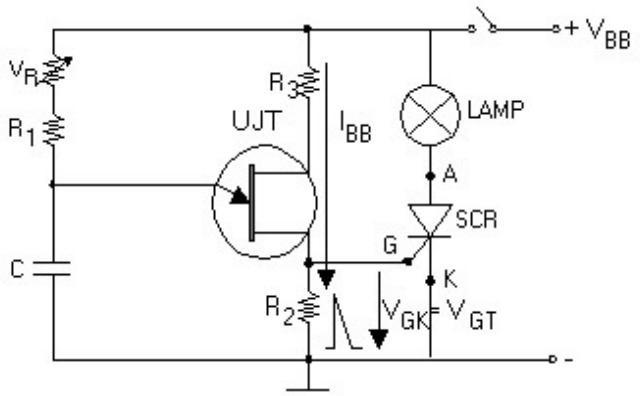
<u>V_0 ขณะ UJT "ON"</u>

$$[V_{0(max)} = V_{R2} = (R_2 \text{ x } V_A) / (R_{RB1} + R_2)]$$

$V_{0(max)} = [R_2 \times (V_P - V_D)] / (R_{RB1} + R_2)$ ---------- (*)



รูป คลื่นแรงดันของวงจร



SCR # 2N2573 ถึง 2579
GATE TRIGGER VOLTAGE
* VGT(min) = 0.3 V
(TYP) = 1.0 V
(max) = 0.5 V
*IGT (min) = 2.0 mA
(max) = 40 mA

$R_{2(max)} <= V_{GK(min)} / I_{BB}$ ---------- (*)

ถ้า R_2 มีค่ามากไป แรงดันตกคร่อมจะทำให้ SCR "ON" ตลอดเวลา เพราะฉะนั้น ต้องต่ำกว่า $V_{GK(min)}$ จาก $R_{BB} >> (R_2 + R_3)$; เมื่อ UJT "ON" R_{BB} ลดลง I_{BB} จะเพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้น

$$R_{2(max)} \simeq [V_{GK(min)} \text{ x } R_{BB}] / V_{BB} \quad \text{---------- (*)}$$

EXAMPLE

I_F V_{BB} = 25 V , $V_{GK(min)}$ = 0.3 V , n = 0.6 , R_{BB} = 4 KOhm จงหา $\mathbf{R_{2(max)}}$ **,** $\mathbf{R_3}$

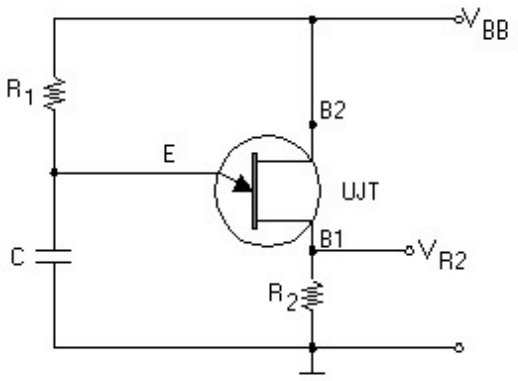
SOLOTION

$[R_{2(max)} \simeq [V_{GK(min)} \text{ x } R_{BB}] / V_{BB}]$

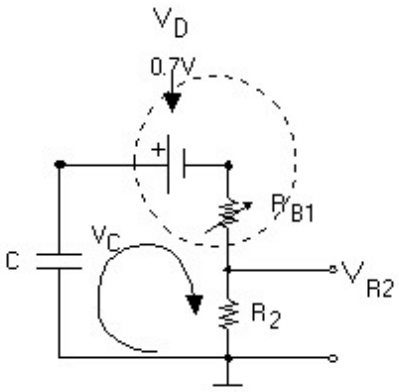
$[R_{2(max)} \simeq (0.3V \text{ x } 4K) / 25V =$ **48 Ohm**

$R_3 \simeq 028\ R_{BB} / nV_{BB} = (0.28 \text{ x } 4K) / (0.6 \text{ x } 25) =$ **74.6 Ohm**

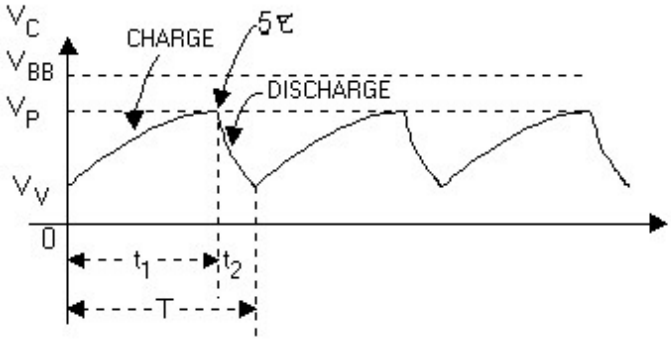
การหาค่า ความถี่ในวงจร RELAXATION OSc



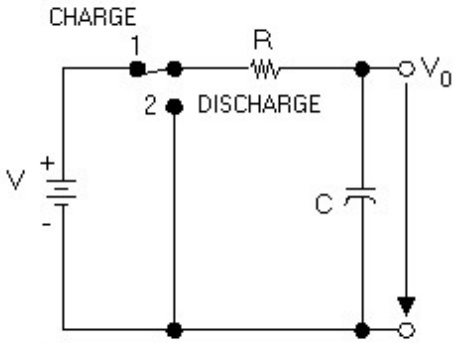
(a)



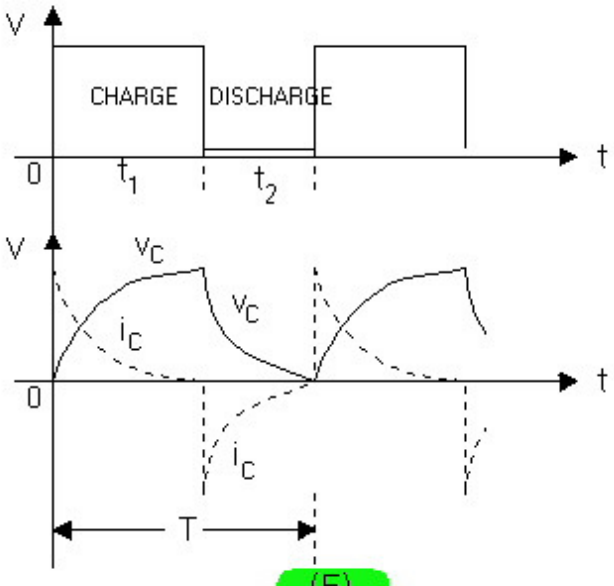
(b)



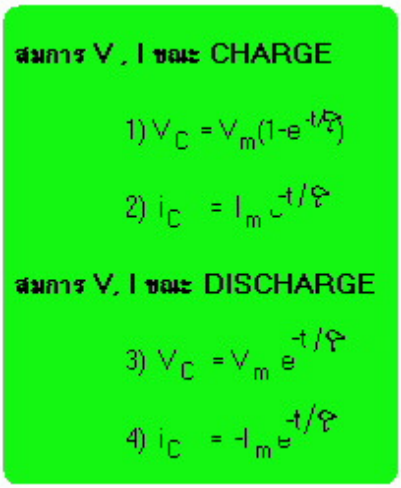
(c)



(d) การอัดและคายประจุของ R-C



(E)



จากรูปคลื่น C สามารถกำหนดได้ดังนี้

VC (CHARGE)

= VV + [(VBB - VV)(1 - et/RC)]

= VV + [(VBB - VV) -(VBB - VV)et/RC]

= VBB - (VBB - VV)et/RC

เมื่อ VC = VP , t = t1

และ [VP = VBB - (VBB - VV)et/RC]

หรือ [(VP - VBB) / (VBB - VV) = -et/RC

และ [et/RC = (VBB - (VP) / (VBB - VV)]

ทำให้ e หมดไปโดยการใช้ loge หรือ ln

logee-t/RC = loge[(VBB - (VP) / (VBB - VV)]

[-t1/R.C] = loge[(VBB - (VP) / (VBB - VV)]

ทำ (-) ให้หมดไป

$t1 = RC \ln[(VBB - (VV) / (VBB - VP)]$ ---------- (1)

เวลาระหว่าง t1 ---> t2

VC(discharge) = VPe-t/RC

VC = VPe-t/(RB1+RB2)C

ให้ t1 เทียบเป็น t = 0

(VC = VV) , ให้ (t = t2)

VV = VPe-t2/(RB1+RB2)C

VV / VPe = e-t2/(RB1+RB2)C

e-t2/(RB1+RB2)C = VV / VPe

เพราะฉนั้น ทำ e ให้หมดไปโดยใช้ $\log_e$

$\log_e e^{-t_2/(R_{B1}+R_{B2})C} = \log_e V_V / V_P$

$-t_2 = (R_{B1}+R_{B2}) .C \ln(V_V / V_P)$

ทำ (-) ให้หมดไป กลับเศษ ln เป็นส่วน

$t_2 = (R_{B1}+R_{B2}) .C \ln(V_P / V_V)$ .....(2)

จาก

$T = t_1 + t_2$

และ

$F_{OSC} = 1/T = 1/t_1 + t_2$ .....(*)

ถ้าให้

$t_1 >> t_2$ เพราะฉนั้น T ประมาณ t_1

$$T = RC \ln[(V_{BB} - V_V) / (V_{BB} - V_P)]$$

เมื่อ

$V_{BB} >> V_V$

$$T = RC \ln[V_{BB} / (V_{BB} - V_P)]$$

หารด้วย V_{BB}

$$T = RC \ln\{ 1 / [1 - (V_P / V_{BB})]\}$$

จาก $n = V_P / V_{BB}$

เพราะฉนั้น

$T \simeq RC \ln[1 / (1 - V_{BB})]$ .....(3)

หรือ

$f \simeq 1 / \{ RC \ln[1 / (1 - n)]\}$ .....(4)

<u>คาบเวลา</u>

$T = RC \ln[1 / (1 - n)]$ .....(1)

หรือ

$T = 2.3 RC \log_{10}[1 / (1 - n)]$ .....(2)

ถ้า $n = 0.63$ จะได้ $\ln[1 / (1 - n)] \simeq 1$

$T \simeq RC$ .....(3)

สำหรับ UJT # 2N2646 , # 2N2647

$R_3 \simeq 10{,}000 / nV_{BB}$ .....(4)

สำหรับ UJT # 2N489 , # 2N1671A , # 2N2160

$R_3 \simeq [0.4\ R_{BB} / n\ V_{BB}] + \{ [1 - n) . R_2] / n \}$ .....(5)

ถ้ามี R_3 หาค่า R_2 ไปทริก SCR ได้จาก

$[R_2 / (R_3 + R_{BB} + R_2)] \times V_{BB} <= V_{GT(min)}$ .....(6)

ไอซีตั้งเวลา 555 (555 Timer IC)

ไอซีตั้งเวลา 555 เป็นไอซีที่ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณตามเวลาที่ออกแบบไว้ โดยสามารถกำหนดได้ด้วยตัวอุปกรณ์ภายนอก ไอซีตั้งเวลา 555 สามารถกำเนิดสัญญาณ อะสเตเบิ้ล (Astable) โมโนสเตเบิล (Monostable) และประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวกับการตั้งเวลาได้ดี

ไอซีตั้งเวลา 555 วงจรตั้งเวลาที่มีความเที่ยงตรงค่อนข้างสูง จำเป็นต้องใช้วงจรโมโนสเตเบิล ซึ่งส่วนมากนิยมใช้ไอซีเบอร์ 74121,74122,74123 อย่างไรก็ตาม การควบคุมการจุดชนวน (Trigger) ของสัญญาณอินพุตไอซีตระกูล 74 สามารถกระทำได้ยาก และมีเงื่อนไขมาก แต่ถ้าการหน่วงเวลานานกว่าครึ่งนาที และโหลดต้องการกระแสจะต้องใช้เวลาเบอร์ 555

ในการใช้งานของวงจรโมโนสเตเบิล (Monostable) จะแบ่งเป็น 2 สภาวะ คือสภาวะที่คงที่ และสภาวะที่ไม่คงที่ โดยปกติวงจรโมโนสเตเบิล จะอยู่ในสภาวะคงที่ จนกว่าจะมีสัญญาณจุดชนวนเข้ามากระตุ้น จากนั้นเอาท์พุตจะเปลี่ยนสภาวะจากเดิม เกิดการหน่วงเวลาด้วยค่าของเวลาที่แน่นอน และกลับเข้าสู่สภาวะปกติเช่นเดิม

ไอซีที่นิยมนำมาสร้างเป็นวงจรตั้งเวลาได้ดีที่สุดเบอร์หนึ่งคือ ไอซีเบอร์ 555 เพราะมีคุณสมบัติในการหน่วงเวลาที่ดี และนานพอสมควร

1.คุณสมบัติของไอซี 555 แต่ละขา

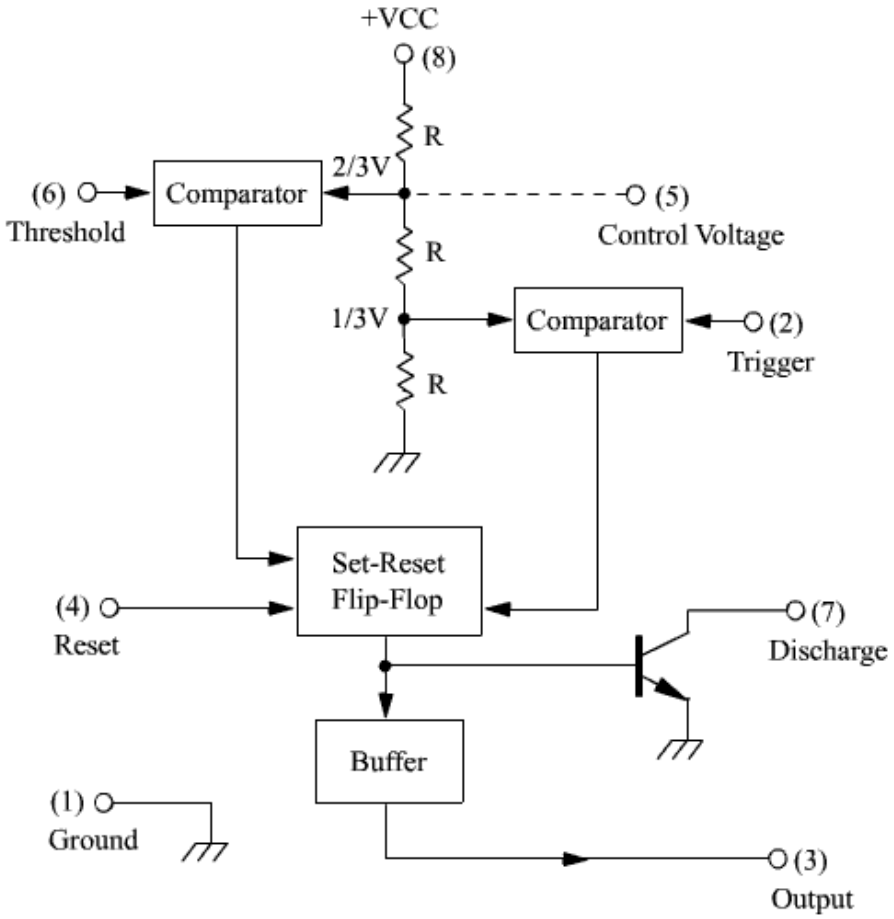
1.1 ขา1 กราวด์(Ground)

1.2 ขา 2 ทริกเกอร์ (Trigger) เป็นขาที่มีความไวหรือแรงดันที่มีค่า 1/3 ของแหล่งจ่าย Vcc และจะเกิดการจุดชนวนของอินพุต ทำให้เอาท์พุตเปลี่ยนจากระดับต่ำเป็นระดับสูง โดยทั่วไปความกว้างของพัลซ์ที่จะมาจุดชนวนอินพุตได้นั้นต้องมีค่าเวลา มากกว่า 1 uS ขึ้นไป หลังจากจุดชนวนอินพุตแล้ว ทำให้เกิดการหน่วงเวลาของสัญญาณหลายไมโครวินาที ซึ่ง

จะทำให้ได้ค่าความกว้างต่ำสุดมีค่า 10 uS ขนาดของแรงดันที่เหมาะในการจุดชนวนนี้ มีค่าระหว่าง + Vcc และกราวด์ สำหรับกระแสจุดชนวนที่ต้องการนั้นมีค่า 500 uA

1.3 ขา 3 เอาท์พุต (Output) แรงดันเอาท์พุตที่เกิดขึ้นสำหรับเอาท์พุตระดับสูง มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า +Vcc ประมาณ 1.7 v สำหรับเอาท์พุตระดับต่ำนั้น จะขึ้นอยู่กับแล่งจ่ายไฟที่ป้อน เช่น ที่ +Vcc= 5 V เอาท์พุต ระดบต่ำจะมีค่าประมาณ 0.25V ที่ 5 mA และที่ +Vcc =15V เอาท์พุตระดับต่ำจะมีค่าประมาณ 2 V ที่ 100mA

1.4 ขา 4 รีเซต (Reset) เมื่อต้องการให้เอาต์พุตอยู่ในระดับต่ำ ต้องป้อนศักย์ไฟฟ้าที่ขานี้ประมาณ 0.7 V โดยกระแสซิงก์มีค่า 0.1 mA ค่าของเวลาประวิงในการทำให้เอาต์พุตเปลี่ยนเป็นระดับต่ำมีค่า 0.5 ตS ซึ่งค่านี้เป็นค่าเป็นค่าต่ำสุดของความกว้างของพัลส์ที่จะมาควบคุมขานี้ ในกรณีทีไม่ต้องการใช้ขานี้ก็ควรต่อเข้ากับ +VCC



1.5 ขา 5 กระแสซิงก์ ที่เข้ามาขานี้สามารถรับได้ใกล้เคียงกับเอาต์พุต ดังนั้นค่าแรงดันที่มีค่า 2/3 +VCC ซึ่งเป็นแรงดันระดับสูงที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ปกติในการทำงานขานี้จะไม่ถูกใช้ แต่ควรใช้ตัวเก็บประจุค่า 0.01ตF ต่อลงกราวด์เพื่อไม่ให้ถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนขณะทำงาน

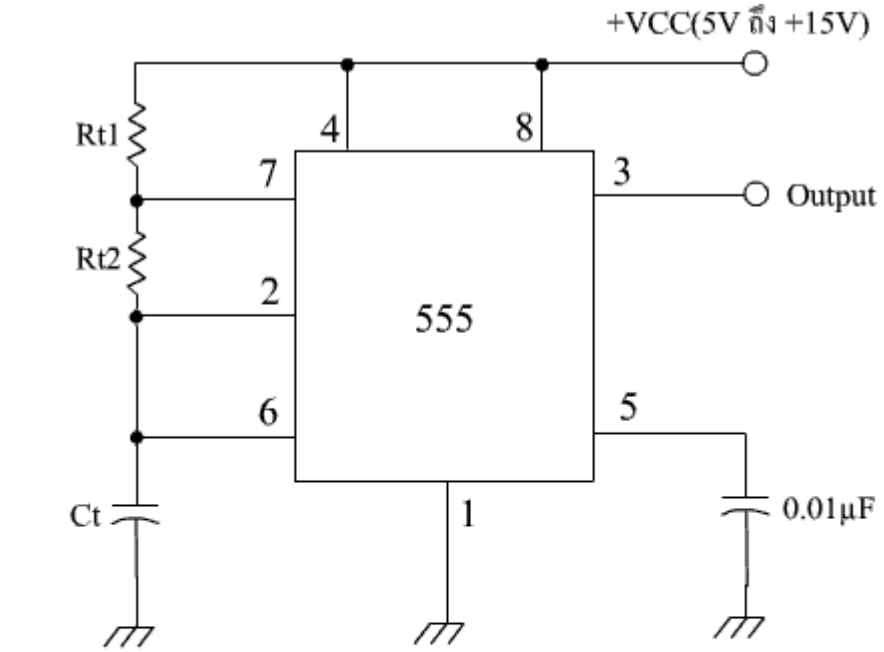
1.6 ขา 6 เทรสโฮล (Threshold) ถ้าศักย์ไฟฟ้าที่ขานี้สูงถึง 2/3 ของ+ Vcc จะเป็นระดับที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลง คือจะทำให้สภาวะเอาท์พุตเปลี่ยนแปลงจากระดับสูงและระดับต่ำ

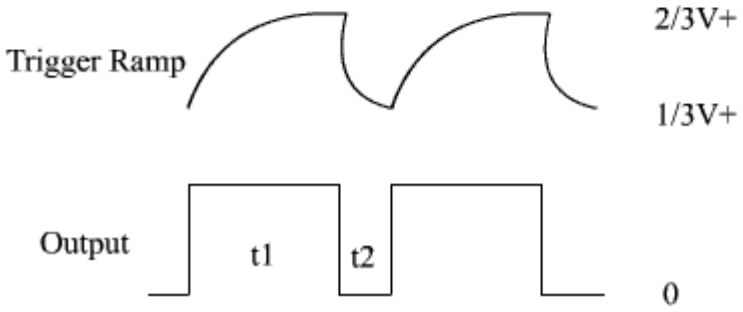
1.7 ขา 7 ดิสชาร์จ (Discharge) ขานี้ต่อกับขาคอลเล็กเตอร์ ของทรานซิสเตอร์ซึ่งอยู่ภายในตัวไอซี โดยขาอิมิเตอร์ต่อวงกราวด์ ทรานซิสเตอร์นี้จะทำหน้าที่กำหนดเวลาของระดับเอาท์พุต ถ้าเอาท์พุตอยู่ในระดับต่ำ ทรานซิสเตอร์นี้จะมีความต้านทานต่ำ ในขณะที่ทรานซิสเตอร์มีความต้านทานต่ำ ตัวเก็บประจุจะสามารถคายประจุผ่านทรานซิสเตอร์นี้ได้

1.8 ขา 8 ไฟเลี้ยง (+Vcc) ต้องการแหล่งจ่ายไฟตรงที่มีศักย์บวก มีค่าอยู่ระหว่าง 5 โวลท์ ถึง 15 โวลท์ แม้ว่าจะทำงานในช่วงแรงดันที่ต่างกัน แต่ละช่วงของเวลาทำงานที่เปลี่ยนไปยังคงมีค่าน้อยมาก คือ ร้อยละ 0.1 ต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดัน 1 โวลท์

การทำงานของวงจรทั้งแบบโมโนสเตเบิล (Monostable) และแบบอะสเตเบิล (Astable)ทรานซิสเตอร์ตัวนี้จะทำหน้าที่เป็นสวิตซ์ เพื่อควบคุมการเก็บประจุและคายประจุ ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุเป็นตัวกำหนดเวลาเมื่อทรานซิสเตอร์ทำงานในภาวะ อิ่มตัวศักย์ไฟฟ้าที่ขา 7 นี้ มีค่า 100 mA ที่กระแสซิงก์ 5 mA หรือน้อยกว่า เมื่อทรานซิสเตอร์ทำงานสภาวะออฟจะมีกระแสไหลผ่านขา 7 นี้ประมาณ 20 nA คุณสมบัติของขา 7 นี้เป็นตัวจำกัดค่าของตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน คือจะต้องมีค่าไม่มากจนเกินไป เพราะกระแสที่รั่วไหลผ่านตัวต้านทานมาประจุ (Charge) ที่ตัวเก็บประจุ ต้องมีค่ามากกว่ากระแสรั่วไหลของทรานซิสเตอร์(Transistor)

2.วงจรอะสเตเบิลโดยใช้ไอซี 555





t1 = 0.693(Rt1+Rt2)Ct t2 = 0.693Rt2Ct

T = 0.693(Rt1+2Rt2)Ct

เมื่อ t1 = ช่วงเวลาที่มีค่ามาก (ON) t2 = ช่วงเวลาที่มีค่าน้อย (OFF)

T = เวลารวมทั้งหมด (t1+t2)

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(Rt1 + 2Rt2)Ct}$$

3.การทำงานของวงจร

1. เมื่อป้อนแหล่งจ่าย +VCC เข้าวงจรจะมีกระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งไหลผ่าน Rt1และ Rt2 มาประจุที่ Ct ทำให้แรงดันที่ตกคร่อม Ct มีค่าสูงขึ้นจนถึง 1/3 ของแหล่งจ่าย +Vcc ขา 2 ซึ่งมีความไวต่อแรงดันนี้ จะจุดชนวน (Trigger) ทำให้เอาท์พุต เปลี่ยนจากระดับต่ำ (Low) เป็นระดับสูง (High) ทันที

2. แรงดันที่ตกคร่อม C_t จะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยจนมีระดับแรงดัน 2/3 ของแหล่งจ่าย +Vcc ขา 6 ซึ่งมีความไวต่อแรงดันนี้ จะตรวจจับทำให้เอาท์พุท เปลี่ยนจากระดับสูงเป็นระดับต่ำและเป็นผลทำให้ขา 7 มีความต้านทานต่ำ C_t จะคายประจุผ่าน R_{t2} ที่ต่ออยู่กับขา 6 มีความไวต่อระดับของศักย์ไฟฟ้าขนาดนี้ด้วย จึงทำให้เอาท์พุท เปลี่ยนจากระดับต่ำเป็นระดับสูงอีกครั้ง

3. การที่เอาต์พุต (Output) เปลี่ยนจากระดับของศักย์ไฟฟ้าต่ำเป็นระดับสูงทำให้ขา 7 มีความต้านทานสูงตัวเก็บประจุ C_t ประจุ ผ่าน R_{t1} และ R_{t2} ใหม่อีกครั้งซึ่งทั้งหมดนี้ก็เป็นหนึ่งรอบของการทำงาน

4.การเลือกใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุในวงจรตั้งเวลา

1. กำหนด R_t ไม่ให้มีค่าต่ำกว่า 10k เพราะต้องการประหยัดพลังงานและไม่ต้องการให้ความกว้างของพัลซ์แคบเกินไป

2. ค่าต่ำสุดของตัวเก็บประจุมีค่า 100 PF นั้นกำหนดขึ้นมาเพื่อป้องกันผลที่อาจจะเกิดจากความจุค้าง

3. ค่าสูงสุดของ R_t กำหนดจากกระแสรั่วไหลของเทรสโฮล (Treshole) รวมกับกระแสรั่วไหลที่ขาดิสชาร์จ (Dischage) และกระแสรั่วไหลของตัวเก็บประจุดังนั้นการกำหนดค่า ของ R_t ต้องทำให้กระแสไหลผ่านมีค่ามากกว่ากระแสเทรสโฮล รวมกับกระแสรั่วไหลที่ขาดิสชาร์จ

และกระแสรั่วไหลที่ตัวเก็บประจุอย่างน้อย 1 เท่า (สำหรับวงจรที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงควรมีค่ามากกว่า 100 เท่า)

4. ค่าสูงสุดของตัวเก็บประจุถูกจำกัดอยู่ที่ค่ากระแสรั่วไหลไม่ใช่ค่าความจุ แต่ค่าของกระแสรั่วไหลนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเก็บประจุและการใช้งานด้วย โดยทั่วไปตัว

5. สำหรับงานโดยทั่วไป สัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิของตัวต้านทานที่ใช้ควรใช้อยู่ในช่วง 200 ถึง 500 ppm/C ทั้งชนิดคาร์บอนและคาร์บอนฟิล์ม ใช้ค่าผิดพลาด ± 5 ถึง $\pm$ ร้อยละ10

6. สำหรับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง ตัวต้านทานควรใช้ชนิดฟิล์มโลหะ ที่มีค่าความผิดพลาด ± 0.1 ถึง $\pm$ร้อยละ 5 สัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิมีค่า 25 ถึง 100 ppm/C

7. โดยทั่วไปตัวต้านทานที่ใช้มักมีค่าอยู่ระหว่าง 100 โอห์ม ถึง 1 เมกะโอห์ม แต่ถ้าต้องการใช้ค่าความต้านทานสูงมากกว่านั้น ควรใช้ตัวต้านทานที่มีความแน่นอนละเสถียรภาพต่ออุณหภูมิดี ซึ่งหาได้ยากและราคาแพง

8. ตัวต้านทานที่ใช้กำหนดค่าเวลา ควรหลีกเลี่ยงการใช้ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบบคาร์บอน ถ้าจำเป็นต้องใช้ให้อยู่ในช่วงแคบๆ เพราะว่ามีค่าสัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิสูง ในกรณีที่ต้องการให้ปรับได้ช่วงกว้าง ควรใช้ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้แบบเซอร์เมต แต่ถ้าใช้ตัวต้านทานชนิดนี้จะมีค่าความต้านทานต่ำ ในกรณีแหล่งจ่ายไฟมีค่ามาก ไม่ควรให้ตัวต้านทานชนิดนี้รับพลังงานเกิน 1 ใน 5 ของอัตรากำลังที่จะทนได้

9. ตัวเก็บประจุไม่ควรใช้ขนาดใหญ่ และควรใช้ค่าผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 5 มีกระแสรั่วไหลต่ำ มีสัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิต่ำ และไดอิเล็กตริกมีการดูดกลืนดี

ตัวเก็บประจุที่มีกระแสรั่วไหลต่ำนั้น สามารถประจุไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ที่มีค่า 1 uA ได้ ซึ่งหมายความว่ากระแสรั่วไหลของตัวเก็บประจุเอง มีค่าน้อยกว่าแหล่งจ่ายกระแสที่จ่ายให้ตัวเก็บประจุ ซึ่งจะต้องน้อยกว่าตลอดเงื่อนไขของแรงดันขณะทำงาน

10. ตัวเก็บประจุจะต้องสามารถประจุและคายประจุได้ เมื่อปลายขั้วทั้งสองต่อถึงกัน ไดอิเล็กตริกต้องไม่เก็บพลังงานค้างขณะทำการประจุ ซึ่งถ้ามีการเก็บพลังงานไว้หลายเปอร์เซ็นต์แล้ว จะเป็นผลเสียในการตั้งเวลา คือเวลาที่ตั้งจะไม่เริ่มจากศูนย์ ควรหลีกเลี่ยงการใช้ตัวเก็บประจุที่มีไดอิเล็กตริกดูดกลืนสูง ในวงจรตั้งเวลาซึ่งรวมทั้งตัวเก็บประจุชนิดกระดาษ, เซรามิคและไมก้าบางชนิด ซึ่งมีการดูดกลืนของไดอิเล็กตริกสูงถึงร้อยละ 3 ถึง 5 ตัวเก็บประจุที่ควรใช้ ได้แก่ พลาสติกฟิล์ม , โพลี่สไตรีน ,โพลี่คาบอเนต สำหรับตัวเก็บประจุชนิดโพลี่คาบอเนตมีการดูดกลืนของไดอิเล็กตริกน้อยกว่า ร้อยละ 1 และตัวเก็บประจุชนิดโพลี่สไตรีน หรือพารลี่รีน จะมีการดูดกลืนของไดอิเล็กตริกน้อยกว่าร้อยละ0.1 สำหรับตัวเก็บประจุที่มีไดอิเล็กตริกแบบเทฟลอนยิ่งเหมาะกับวงจรตั้งเวลา แต่ราคาค่อนข้างแพง

10.1โพลี่สไตรีน(Polystyrene) ถือว่าเป็นไดอิเล็กตริกที่ดีที่สุด เมื่อเทียบกับความเชื่อถือและราคา แต่มีข้อจำกัด คือ สามารถใช้กับอุณหภูมิที่ไม่เกินกว่า 85 องศา และค่าตัวเก็บประจุไม่เกิน 1 uF ค่าความผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิเป็นเชิงเส้น ซึ่งทำให้สามารถทำการชดเชยโดยใช้เทอร์มิสเตอร์ได้ถ้าจำเป็น

10.2 พาลี่รีน (Palyrene) เป็นตัวเก็บประจุที่มีไดอิเล็กตริกเหมือนยูเนี่ยนคาร์ไบต์ มีค่าตั้งแต่ 0.001uF ค่าผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 1 ค่าผิดพลาดร้อยละ 0.5 ค่าสัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิเป็นเชิงเส้นมีค่า 200 $\pm$30 ppm/C ใช้งานที่อุณหภูมิ -55 c ถึง 125 c

10.3 โพลี่คาบอเนต (Polycabonate) เป็นตัวเก็บประจุที่สามารถให้ค่าความจุได้ หลาย 10uF ค่าสัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิไม่เป็นเชิงเส้นเท่ากับตัวเก็บประจุชนิดโพลี่สไต รีน หรือพาลี่รีน ซึ่งไม่สามารถชดเชยได้ง่าย สำหรับการทำงานในช่วงอุณหภูมิ 0c ถึง 70 c ไม่จำเป็นต้องทำการชดเชย ค่าผิดพลาดของตัวเก็บประจุชนิดนี้ ร้อยละ 1

11. ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรลิตริก (Electrolytic Capacitor) ไม่ควรใช้เนื่องจากมีค่าผิดพลาดมากเสถียรภาพไม่ดี ยกเว้นจะใช้ในวงจรที่ไม่ต้องการความแน่นอน แทนตาอิเล็กโทรลิติก (Tanta Electroly Capacitor) สามารถใช้งานในวงจรตั้งเวลาได้ดี แต่ต้องอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 50 c การทำงาน อาศัยแรงดัน จะช่วยควบคุมกระแสรั่วไหลสำหรับตัวเก็บประจุชนิดนี้เพราะกระแสของตัวเก็บ ชนิดนี้ มีค่าหลายไมโครแอมป์ ซึ่งจำเป็นต้องลดช่วงของการใช้งานของตัวต้านทานลง

5.ไอซีเบอร์ 555 ที่ใช้ในการค้า

ไอซีเบอร์ 555 ที่ใช้ในทางการค้าจะใช้ทำงานในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0^0 C ถึง 70 ^{0}C ในการตั้งเวลาอย่างง่ายโดยใช้วงจรโมโนสเตเบิ้ล หาคาบเวลาโดยใช้สมการ T = 1.1 RtCt ซึ่งจะมีค่าความผิดพลาดร้อยละ 1 (ไม่รวมค่าความผิดพลาดอันเกิดจาก Rt , Ct) ส่วนวงจรอะสเตเบิ้ลมีค่าความผิดพลาดประมาณร้อยละ 2 สำหรับวงจรโมโนสเตเบิ้ล ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทำให้เวลาผิดพลาดไป 50 ppm/^{0}C หรือร้อยละ 0.005/^{0}C ส่วนวงจรอะสเต เบิ้ลผิดพลาดประมาณ 150 ppm/^{0}C และผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ป้อนให้กับวงจรสามารถทำให้เวลาผิดพลาดไป ร้อยละ 0.1/V กระแสเอาต์พุตทั้งซิงก์และซอร์สมีค่า 20 mA ไอซีเบอร์ 555 นี้กินกระแสประมาณ 3 mA ที่ 5 V หรือ 10 mA ที่ 15 V (ไม่รวมกระแสโหลด)

อย่างไรก็ตามยังมีไอซีเบอร์ 755 ซึ่งมีไอซีตั้งเวลาแบบซีมอส สามารถใช้แทนไอซีตั้งเวลาเบอร์ 555 ได้โดยตรงในวงจรเกือบทั้งหมด แต่มีข้อดีเหนือกว่าไอซีเบอร์ 555 ดังนี้

1. กินไฟน้อยกว่ามาก คือ ดึงกระแสในภาวะปกติไม่มากกว่า 0.3 mA (555 ดึงกระแสไม่มากกว่า 15 mA)

2. ใช้ได้กับแรงดันไฟเลี้ยงได้กว้างมาก คือ จาก +2 V ถึง +18 V (555 ใช้ได้กับ +4.5 V ถึง +15 V)

3. ใช้งานเป็นวงจรอะสเตเบิ้ล (Astable) ได้กับความถี่สูง ได้ไม่น้อยกว่า 500 KH_Z

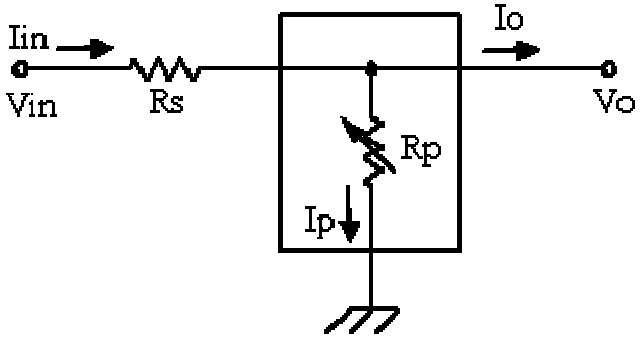
4. อินพุตทั้งหมดเช่น ขาทริกเกอร์ (Tigger) ขารีเซต (Reset) ขาเทรสโฮล (Tresshold) ดึงกระแสน้อยมาก คือ เพียงประมาณ 0.02 μA เท่า นั้น (555 ถึงประมาณ 2 μA) จึงทำให้ใช้ค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุในส่วนตั้งเวลาได้สูงมาก ดังนั้นจึงสามารถออกแบบวงจรตั้งเวลาได้นานกว่า 555 ธรรมดามาก

5. ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสภาวะของเอาต์พุต (Output) จะดึงกระแสเสิร์จจากแหล่งจ่ายไฟน้อยมาก คือ เพียง 2 – 3 mA เท่า นั้น ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีตัวเก็บประจุต่อที่ขา 5 และคร่อมไฟเลี้ยงเพื่อรักษาแรงดันให้คงที่ดังเช่น วงจร 555 ทั่วๆไป จึงสามารถประหยัดตัวเก็บประจุไปได้ 2 ตัวเลยทีเดียว และไม่เกิดสัญญาณไปรบกวนมาก อย่างไรก็ตามเวลาใช้งานไอซี 555 ก็ต้องระวังเช่นเดียวกับไอวีซีมอสอื่นๆ คือ อย่าให้แรงดันอินพุต (V) ที่ขาต่างๆ ในภาวะใดๆ มีค่าสูงกว่าแรงดันไฟเลี้ยงที่กับตัวไอซีเกินกว่า 0.3 V และไม่ต่ำกว่า - 0.3 V มิฉะนั้นไอซีจะเสียหายได้และถ้าเป็นไปได้ควรเปิดไฟเลี้ยง วงจรไอซีเบอร์นี้ไว้ก่อนจะป้อนแรงดันอินพุตเข้าที่ขาต่างๆ ของไอซีด้วย

ไอซีเร็กกูเลเตอร์ (IC Regulator)

1.เร็กกูเลเตอร์แบบขนาน (Shunt Regulator)

การทำงานของวงจรเร็กกูเลเตอร์แบบขนานดังรูปที่ 1 โดยมีแรงดันอินพุท V_{IN} จ่ายให้กับวงจร มีตัวต้านทาน R_S ทำหน้าที่ในการจำกัดกระแสที่จะไหลผ่านวงจรทั้งหมด ตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ R_P จะทำการปรับค่าเองโดยอัตโนมัติเพื่อให้แรงดันที่เอาท์พุทคง ที่ตลอด สมการของแรงดันเอาท์พุท $V_O = V_{IN} - R_S (I_O + I_P)$



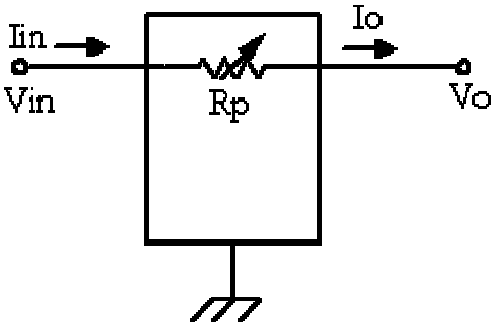
รูป ที่ 1 แสดงแผนผังการทำงานของเร็กกูเลเตอร์แบบขนาน

ตัวอย่างของวงจรประเภทนี้ได้แก่วงจรเร็กกูเลเตอร์ที่ใช้ตัวต้านทานต่อกับซี เนอร์ไดโอด ซึ่ง R_P ในที่นี้ก็คือซีเนอร์ไดโอดนั่นเอง

2. เร็กกูเลเตอร์แบบอนุกรม (Series Regulator)

หลักการทำงานของเร็กกูเลเตอร์แบบอนุกรมนี้ แสดงในรูปที่ 2 โดยมีการจ่ายแรงดันที่ยังไม่ได้มีการเร็กกูเลทไปยัง R_P โดย R_P จะปรับค่าความต้านทานของตัวเองได้อัตโนมัติ ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ R_P ค่าหนึ่ง จะได้แรงดันเอาท์พุทเท่ากับ แรงดันอินพุทลบด้วยแรงดันตกคร่อมในตัวเร็กกูเลเตอร์ ซึ่งผลของการปรับค่า R_P ที่ถูกต้อง ก็จะทำให้ได้แรงดันเอาท์พุทตามที่

ต้องการ และจากหลักการทำงานของเร็กกูเลเตอร์ชนิดนี้เองที่ได้นำมาประยุกต์ทำเป็นไอซี เร็กกูเลเตอร์เบอร์ต่างๆ ทั้งเบอร์ 78XX เบอร์ 79XX และ อื่นๆ อีก



รูป ที่ 2 แสดงแผนผังการทำงานของเร็กกูเลเตอร์แบบอนุกรม

3. แผนผังวงจรพื้นฐานของเร็กกูเลเตอร์แบบอนุกรม

แผนผังวงจรพื้นฐานของเร็กกูเลเตอร์ชนิดนี้ สามารถแบ่งออกได้ 3 ภาค ดังแสดงในรูปที่ 3 ประกอบไปด้วย

1.วงจรแรงดันอ้างอิง (Voltage Referent) ซึ่งเป็นส่วนที่เป็นอิสระต่อทั้งอุณหภูมิและแรงดันที่จ่ายให้กับเร็กกูเล เตอร์

2.วงจรขยายความผิดพลาด (Error Amplifier) ทำหน้าที่คอยเปรียบเทียบแรงดัน ระหว่างแรงดันอ้างอิงและสัดส่วนของแรงดันเอาท์พุท ที่ป้อนกลับมาที่ขาอินเวอร์ติ้งของออปแอมป์

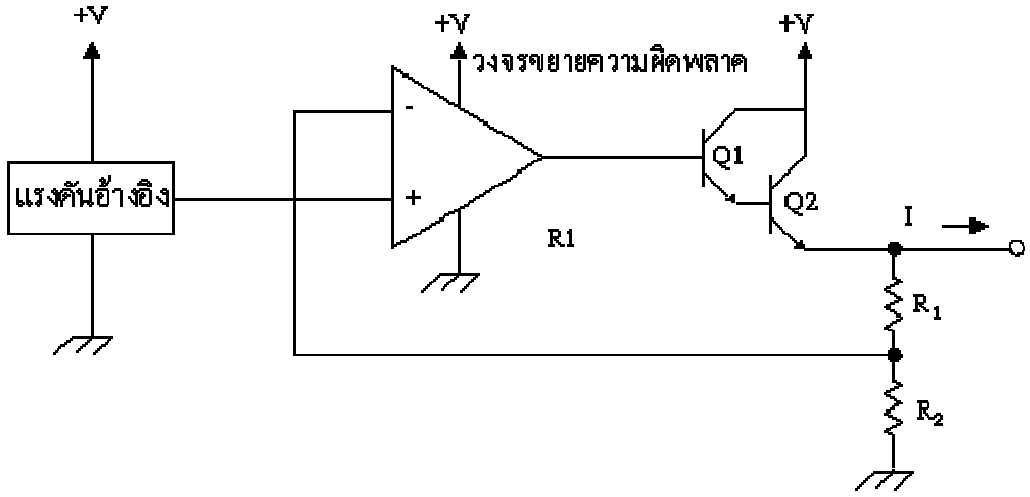
3.ซีรีส์พาสทรานซิสเตอร์ (Series Transistor) ทำหน้าที่จ่ายกระแสเอาท์พุทให้เพียงพอกับความต้องการองโหลด

เมื่อป้อนแรงดันอินพุทให้กับไอซีเร็กกูเลเตอร์ แรงดันเอาท์พุทจะถูกป้อนมายังอินพุท โดย R_1 และ R_2 ทำหน้าที่เป็นวงจรแบ่งแรงดัน ซึ่งแรงดันที่ตกคร่อม R_2 จะเป็นสัดส่วนกับ

แรงดันที่เอาท์พุท วงจรขยายความผิดพลาดจะทำหน้าที่รักษาสัดส่วนของแรงดันอ้างอิงกับแรงดันที่ตก คร่อม R_2 ให้เท่ากัน

ถ้าแรงดัน V_{R2} มากกว่า V_{REF} วงจรขยายความผิดพลาดจะลดระดับการขยายสัญญาณเอาท์พุท ทำให้ทรานซิสเตอร์จ่ายกระแสลดลงเป็นผลให้แรงดันเอาท์พุทที่จ่ายให้โหลดลดลงด้วย

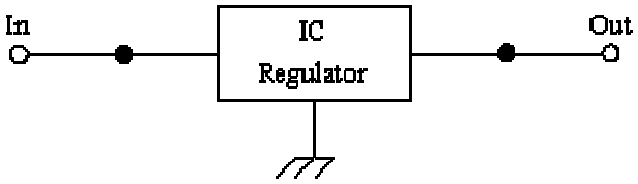
ถ้าแรงดัน V_{R2} น้อยกว่า V_{REF} วงจรขยายความผิดพลาดจะเพิ่มระดับการขยายสัญญาณเอาท์พุท ทำให้ทรานซิสเตอร์จ่ายกระแสเพิ่มขึ้น เป็นผลให้แรงดันเอาท์พุทที่จ่ายให้โหลดเพิ่มขึ้นด้วย



รูป ที่ 3 แสดงแผนผังวงจรพื้นฐานของเร็กกูเลเตอร์แบบอนุกรม

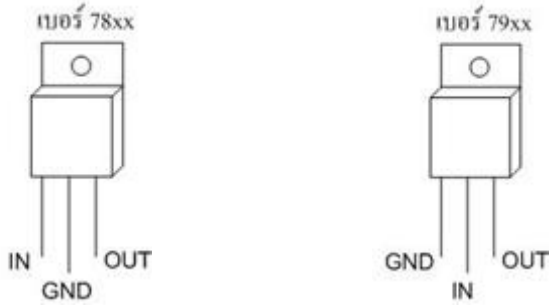
4.ไอซีเร็กกูเลเตอร์สามขาชนิดจ่ายแรงดันคงที่

ไอซีเร็กกูเลเตอร์ภายในประกอบด้วยวงจรเร็กกูเลเตอร์แบบอนุกรม มีขาต่อใช้งาน 3 ขา ประกอบด้วยขา อินพุท เอาท์พุท และกราวด์ ซึ่งจะจ่ายแรงดันค่าใดค่าหนึ่งโดยเฉพาะ โดยรวมเอาส่วนของวงจรป้อนกลับที่ประกอบด้วย R_1 และ R_2 ดังรูปที่ 3 เข้าไว้เป็นส่วนหนึ่งของไอซี ซึ่งจุดนี้นี่เองที่แตกต่างไปจากไอซีเร็กกูเลเตอร์ที่ปรับค่าได้



รูป ที่ 4 แสดงการต่อไอซีเร็กกูเลตอร์ใช้งานแบบง่ายๆ

จุดเด่นของไอซีเร็กกูเลเตอร์ค่าคงที่นี้คือ สามารถต่อวงจรได้ง่ายไม่ต้องต่ออุปกรณ์ภายนอกเพิ่มเติมมากนัก ตัวอย่างวงจรการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4 ในการต่อวงจรบางครั้งจำเป็นต้องต่อไอซีเร็กกูเลเตอร์ห่างจากแหล่งจ่ายไฟ อินพุทเกิน 5 เซนติเมตร จึงควรใส่ตัวเก็บประจุอิเล็กทรอไลต์ ขนาดประมาณ 10 ไมโครฟารัด สักตัวไว้ด้านอินพุท เพื่อป้องกันการเกิดออสซิลเลตที่ความถี่สูง ซึ่งจะทำให้วงจรขาดเสถียรภาพ เอาท์พุทที่ออกจากไอซีเร็กกูเลเตอร์ จะได้แรงดันเอาท์พุทที่เรียบพอสมควรอยู่แล้ว แต่อาจจะใส่ตัวเก็บประจุที่มีค่าประมาณ 100 ไมโครฟารัด เพื่อช่วยปรับปรุงแรงดันให้เรียบขึ้น ถึงแม้ว่าแรงดันไอซีเร็กกูเลเตอร์ชนิดนี้จะให้แรงดันเอาท์พุทคงที่ มีเบอร์ให้เลือกแรงดันเอาท์พุทได้คงที่หลายเบอร์เช่น 5 V, 5.2 V, 6V, 8V, 10V, 12V, 15V, 18V และ 24V กระแสเอาท์พุทตั้งแต่ 10 มิลลิแอมป์ถึง 3 แอมป์ และมีให้เลือกทั้งชนิดเร็กกูเลเตอร์ไฟบวกและเร็กกูเลเตอร์ไฟลบ



รูป ที่ 5 แสดงตำแหน่งขาของ IC Regulator เบอร์ 78xx และ 79xx

ตารางสรุปรวมเบอร์ไอซีเร็กกูเลเตอร์

เบอร์	แรงดันเอาท์พุท	อุณหภูมิรอยต่อ*	กระแสเอาท์พุทสูงสุด (mA)	กระแสสูงสุดเมื่อมีโหลด (mA)	แรงดันอินพุท	แรงะดันตกคร่อม
เร็กกูเลเตอร์กระแสบวกคงที่ 100 mA						
78L26	2.6	C	100	50	4.8 to 35	2.2
78L05	5.0	C	150	60	7.2 to 35	2.2
78L62	6.2	C	175	80	10.4 to 35	2.2
78L82	10.2	C	175	80	10.4 to 35	2.2
78L09	9.0	C	188	90	11.2 to 35	2.2
78L12	12	C	250	100	14.2 to 35	2.2
เร็กกูเลเตอร์กระแสบวกคงที่ 500 mA						
78M05	5.0	M	50	50	10.0 to 35	2.5
78M05	5.0	C	100	100	7.5 to 35	2.5
78M06	6.0	M	60	60	10.0 to 35	2.5
78M06	6.0	C	100	120	10.5 to 35	2.5
78M08	10.0	M	60	80	11 to 35	2.5
78M08	10.0	C	100	160	10.5 to 35	2.5
78M12	12	M	60	120	15 to 35	2.5

เร็กกูเลเตอร์กระแสลบ คงที่ 500 mA						
78M05	-5.0	M	50	100	-7.5 to -35	2.5
78M05	-5.0	C	50	100	-7.3 to -35	2.5
78M06	-6.0	M	60	120	-10.5 to -35	2.3
78M06	-6.0	C	60	120	-10.3 to -35	2.5
78M08	-10.0	M	80	160	-10.5 to -35	2.5
78M08	-10.0	C	80	160	-10.3 to -35	2.3
78M12	-12	M	80	240	14.5 to -35	2.5
78M12	-12	C	80	240	-14.3 to -35	2.3
เร็กกูเลเตอร์กระแสบวกคงที่ 1.0A						
7805	5.0	M	50	50	10.0 to 35	3.0
7805	5.0	C	100	100	7.5 to 35	2.5
7806	6.0	M	60	60	9.0 to 35	3.0
7806	6.0	C	120	120	10.5 to 35	2.5
7808	10.0	M	80	80	11 to 35	3.0
7808	10.0	C	160	160	10.5 to 35	2.5
7812	12	M	120	120	15 to 35	3.0

เร็กกูเลเตอร์กระแสลบคงที่ 1.0A						
7905	-5.0	M	50	50	-7.8 to -35	2.8
7905	-5.0	C	100	100	-7.3 to -35	2.3
7906	-6.0	M	60	60	-10.8 to -35	2.8
7906	-6.0	C	120	120	-10.3 to -35	2.3
7908	-10.0	M	80	80	10.8 to -35	2.8
7908	-10.0	C	160	160	10.2 to -35	2.3
7912	-12	M	120	120	14.8 to -35	2.8
เร็กกูเลเตอร์กระแสบวกคงที่ 3.0A						
LM123	5.0	M	25	100	7.5 to 20	2.5
LM223	5.0	M	25	100	7.5 to 20	2.5

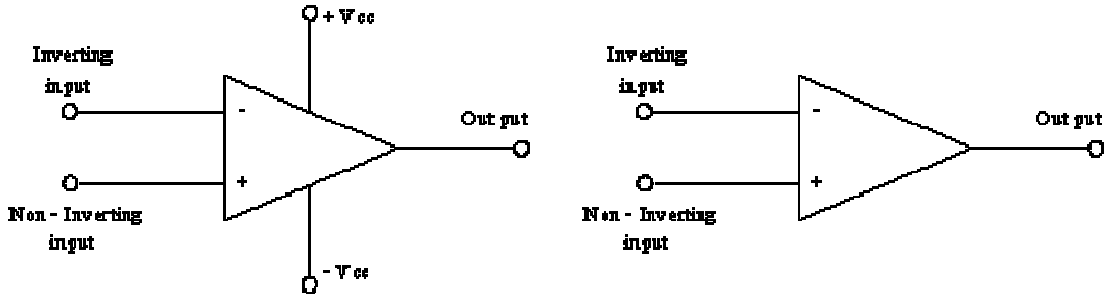
* C = 0°C To + 125°C

M = -55°C To + 150°C

ไอซีออปแอมป์ (Op-Amp I.C)

1. คุณสมบัติของออปแอมป์

ออปแอมป์ (Op-Amp) เป็นชื่อย่อสำหรับเรียกวงจรขยายที่มาจาก Operating Amplifier เป็นวงจรขยายแบบต่อตรง (Direct couled amplifier) ที่มีอัตราการขยายสูงมากใช้การป้อนกลับแบบลบไปควบคุมลักษณะการทำงาน ทำให้ผลการทำงานของวงจรไม่ขึ้นกับพารามิเตอร์ภายในของออปแอมป์ วงจรภายในประกอบด้วยวงจรขยายที่ต่ออนุกรมกัน ภาคคือ วงจรขยายดิฟเฟอเรนเชียลด้านทางเข้า วงจรขยายดิฟเฟอเรนเชียลภาคที่สอง วงจรเลื่อนระดับและวงจรขยายกำลังด้านทางออก สัญลักษณ์ที่ใช้แทนออปแอมป์จะเป็นรูปสามเหลี่ยม ไอซีออปแอมป์เป็นไอซีที่แตกต่างไปจากลิเนียร์ไอซีทั่วๆ ไปคือไอซีออปแอมป์มีขาอินพุท 2 ขา เรียกว่าขาเข้าไม่กลับเฟส (Non-Inverting Input) หรือ ขา + และขาเข้ากลับเฟส (Inverting Input) หรือขา – ส่วนทางด้านออกมีเพียงขาเดียว เมื่อสัญญาณป้อนเข้าขาไม่กลับเฟสสัญญาณทางด้านออกจะมีเฟสตรงกับทางด้านเข้า แต่ถ้าป้อนสัญญาณเข้าที่ขาเข้ากลับเฟส สัญญาณทางออกจะมีเฟสต่างไป 180 องศาจากสัญญาณทางด้านเข้า



รูป ที่ 1 แสดงสัญลักษณ์ออปแอมป์

คุณสมบัติของออปแอมป์ในทางอุดมคติ

1.อัตราขยายมีค่าสูงมากเป็นอนันต์หรือ อินฟินิตี้ (AV = ∞)

2.อินพุทอิมพีแดนซ์มีค่าสูงมากเป็นอนันต์ (Zi = ∞)

3.เอาท์พุทอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำมากเท่ากับศูนย์ (Zo = 0)

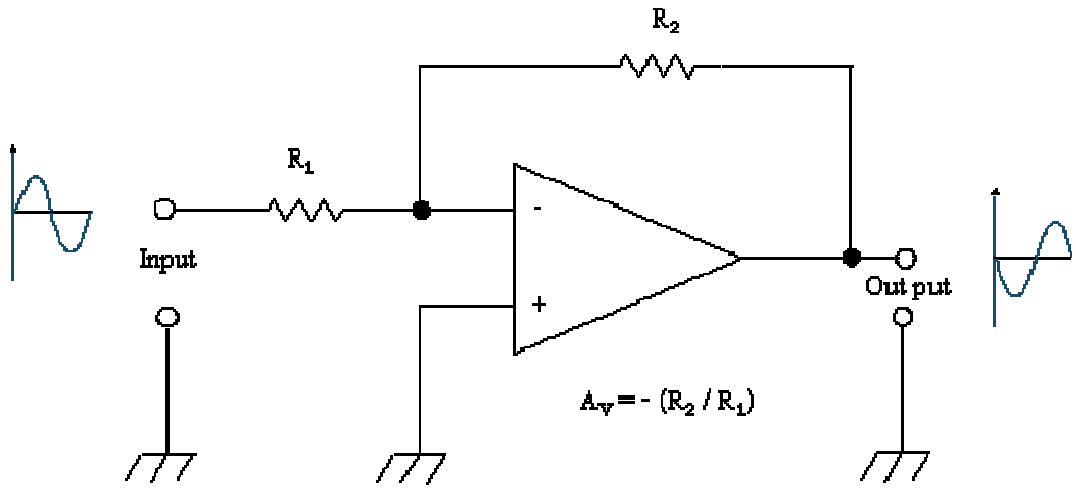
4.ความกว้างของแบนด์วิท (Bandwidth) ในการขยายสูงมาก (BW = ∞)

5.สามารถขยายสัญญาณได้ทั้งสัญญาณ AC และ DC

6.การทำงานไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

เมื่อศึกษาคุณสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคติแล้วพบว่า ออปแอมป์ได้รวมข้อดีของวงจรขยายไว้ได้อย่างครบถ้วน เนื่องจากมีอัตราขยายเป็นอนันต์และสามารถขยายสัญญได้ทั้งไฟกระแสสลับและไฟ กระแสตรง การนำไปใช้งานในบางครั้งเมื่อต้องการลดอัตราการขยายก็สามารถกระทำได้โดยการ ป้อนกลับ (Feed Back) เพื่อมาลดอัตราการขยายลง และข้อดีอีกประการหนึ่งก็คือ อิมพีแดนซ์ทางอินพุทมีอิมพีแดนซ์สูงมาก จึงทำให้เหมือนไม่มีกระแสอินพุทไหลเลยลักษณะเช่นนี้จึงทำให้วงจรทางอินพุท ไม่โหลดวงจรส่งกำลังในส่วนหน้า เช่นเดียวกันที่เอาท์พุทมีอิมพีแดนซ์เป็นศูนย์สามารถนำไปเชื่อมต่อกับวงจร อื่นได้ดี

2. วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)



รูป ที่ 2 วงจรขยายออปแอมป์แบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

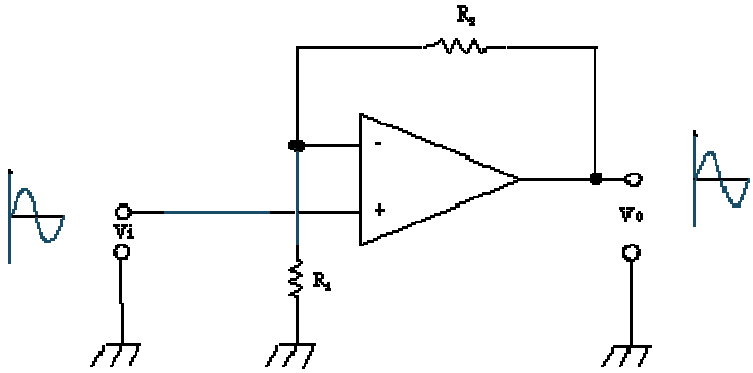
ในวงจรขยายออปแอมป์นั้นสามารถที่จะกำหนดอัตราการขยายของวงจรได้โดยการใช้วงจรเนกาทีฟฟีดแบ็ค (Negative Feedback) เมื่อเราป้อนสัญญาณเข้าทางขากลับเฟส (ขา -) แรงดันด้านทางออกจะมีมุมเฟสต่างไปจากแรงดันทางเข้า 180 องศา ซึ่งมีลักษณะตรงข้ามสัญญาณตรงกันข้ามนี้จะถูกป้อนกลับผ่าน R_2 เข้ามายังขาอินเวอร์ติ้งอีกครั้งหนึ่ง ตรงจุดนี้จะทำให้สัญญาณเกิดการหักล้างกันอัตราการขยายก็จะลดลง ถ้าตัวต้านทานที่เป็นตัวป้อนกลับมีค่ามาก จะทำให้สัญญาณป้อนกลับมีขนาดเล็กอัตราการขยายออกจึงสูง ถ้าตัวต้านทานที่ป้อนกลับมีค่าน้อยสัญญาณป้อนกลับไปได้มากอัตราการขยายก็จะ ลดลง ฉะนั้นอัตราส่วนของความต้านทาน R_1 และ R_2 จะเป็นตัวกำหนดอัตราการขยายของวงจรโดยไม่ขึ้นกับอัตราการขยายของออปแอมป์ ซึ่งสามารถหาอัตราการขยายแรงดันได้จากสูตร

$$AV = -\frac{R_2}{R_1}$$

3. วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier)

วงจรขยายนี้เป็นวงจรขยายอีกแบบหนึ่งที่ต้องการเฟสในการขยายเป็นเฟสเดียวกัน ดังนั้นการป้อนสัญญาณอินพุทจึงต้องป้อนเข้าที่ขาอินพุทไม่กลับเฟส (+) ซึ่งเมื่อขยายออกที่เอาท์พุทแล้วจะได้สัญญาณเอาท์พุทที่มีเฟสเหมือนเดิม ดังนั้นในวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสนี้การป้อนกลับเพื่อลดอัตราการขยายจึงยังคง ต้องป้อนไปยังขาอินเวอร์ติ้ง (-) เพื่อให้เกิดการหักล้างของสัญญาณกันภายในตัวไอซีออปแอมป์ โดยสามารถหาอัตราการขยายของวงจรได้จากสูตร

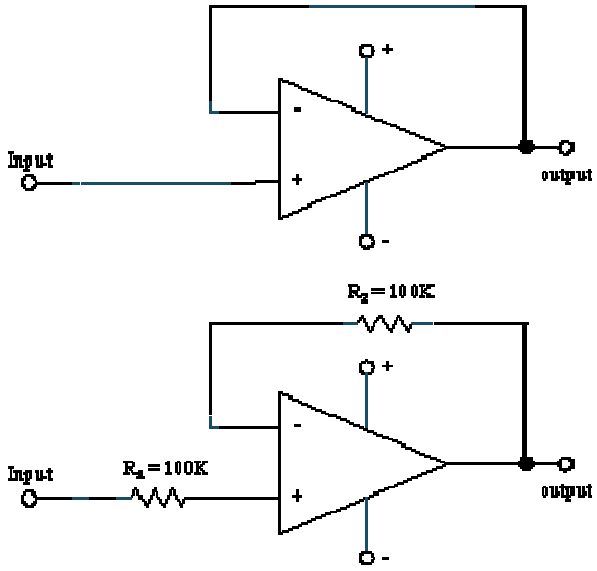
$$AV = \frac{R_2}{R_1} + 1$$



รูป ที่ 3 วงจรขยายออปแอมป์แบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier)

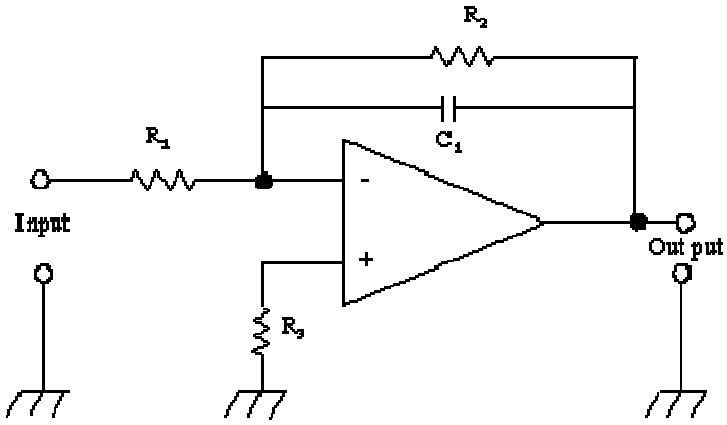
4. วงจรบัฟเฟอร์ (Buffer)

วงจรบัฟเฟอร์หรือวงจรกันชน เป็นวงจรที่ใช้เชื่อมวงจรสองวงจรเข้าด้วยกัน เช่นระบบไอซีที่ต่างตระกูลกันหรือทรานซิสเตอรีที่ไม่แมทชิ่งอิมพีแดนซ์กัน คือวงจรที่จำเป็นต้องใช้บัฟเฟอร์เพราะคุณสมบัติของออปแอมป์ทางเอาท์พุทอิมพี แดนซ์ต่ำ เมื่อเชื่อมต่อกับวงจรอื่นแล้วจะไม่ทำให้วงจรอื่นมีผลแตกต่างไปจากเดิม วงจรบัฟเฟอร์นั้นจะมีอัตราการขยายเท่ากับ 1



รูป ที่ 4 วงจรบัฟเฟอร์

5. วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low Pass Filter)

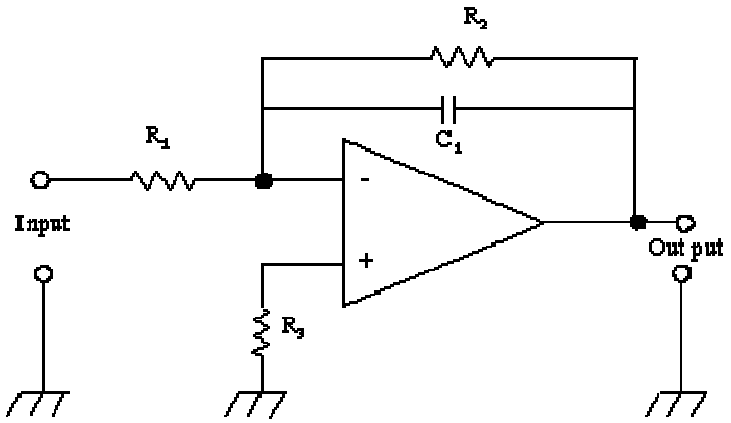


รูป ที่ 5 วงจรกรองความถี่เบื้องต้น

การใช้วงจรกรองแบบอาร์ซี (RC Filter) เข้ามาเป็นเนกาทีฟฟีดแบ็ค (Negative Feedback) การขยายสัญญาณของออปแอมป์จะกรองเอาความถี่เฉพาะบางความถี่ออกไปเท่านั้น ซึ่ง สามารถหาความถี่ที่ใช้งานได้จากสูตร

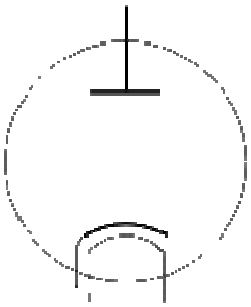
$$F = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} (H_Z)$$

และสามารถที่จะประยุกต์ใช้งานวงจรนี้ในวงจรกรองความถี่ต่างๆ ได้เช่น ภาคกรองความถี่ ไอเอฟ วงจรดักจับความถี่ วงจรออสซิลเลเตอร์ และในเครื่องเสียงก็ยังใช้เป็นระบบแยกความถี่ของเครื่องขยายแบบไบแอมป์และ ไตรแอมป์ ซึ่งวงจรแยกความถี่แบบนี้เป็นวงจรชั้นสูงขึ้นไป เราเรียกวงจรแยกความถี่ว่า “แอคตีฟฟิลเตอร์” (Active Filter) ซึ่งสามารถจัดวงจรแอคตีฟฟิลเตอร์ได้ดังรูป ที่ 6



รูป ที่ 6 วงจรแอคตีฟฟิลเตอร์

ไดโอดแบบใช้ความร้อนและไดโอดแบบสภาวะแก๊ส



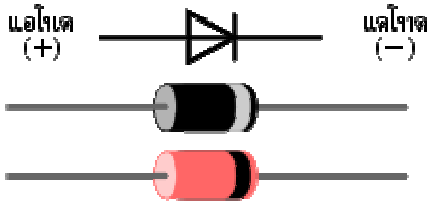
สัญลักษณ์ของไดโอดแบบใช้ความ จากด้านบนถึงด้านล่างคือขั้วบวก (anode), ขั้วลบ (cathode) และไส้ความร้อน (heater filament)

ไดโอดแบบใช้ความร้อนเป็นหลอดสุญญากาศ ภายในประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า (electrode) ล้อมรอบด้วยสุญญากาศภายในหลอดแก้ว คล้ายๆ กับหลอดไส้ (incandescent light bulb)

ในไดโอดแบบใช้ความร้อนนั้น กระแสจะไหลผ่านไส้ความร้อนและให้ความร้อนแก่ขั้วลบหรือขั้วแคโทด ซึ่งขั้วไฟฟ้าจะทำมาจากแบเรียมและสตรอนเชียมออกไซด์ ซึ่งเป็นออกไซด์ของโลหะ แอลคาไลน์เอิร์ท ซึ่งมีสภาวะงาน (work function) ต่ำ (บางครั้งจะใช้วิธีให้ความร้อนโดยตรง โดยการใช้ไส้หลอดเป็นทังสเตน แทนไส้ความร้อนกับขั้วแคโทด) ความร้อนอันเกิดมาจากการส่งผ่านความร้อนของอิเล็กตรอนไป สู่สุญญากาศ ขั้นต่อไปคือขั้วบวกหรือขั้วแอโนดที่ล้อมรอบไส้ความร้อนอยู่จะทำหน้าที่เป็น ประจุบวก นั่นจะเกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนด้วยไฟฟ้าสถิตย์ อย่างไรก็ตามอิเล็กจะไม่ถูกปล่อยไปโดยง่ายจากขั้วแอโนดเมื่อเราต่อกลับขั้ว เพราะขั้วแอโนดไม่มีความร้อน ดังนั้นไดโอดแบบใช้ความร้อนจะทำให้อิเล็กตรอนไหลทิศทางเดียว

สำหรับคริสต์ศตวรรษที่ 20 ไดโอดแบบใช้ความร้อนถูกใช้ในสัญญาณอนาล็อก และใช้เรียงกระแสในแหล่งจ่ายกำลังมากมาย ทุกวันนี้ไดโอดที่เป็นหลอดสุญญากาศในกีตาร์ ไฟฟ้าและเครื่องขยายเสียงแบบ ไฮ-เอน รวมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้แรงดันสูงๆ

ไดโอดแบบสารกึ่งตัวนำ



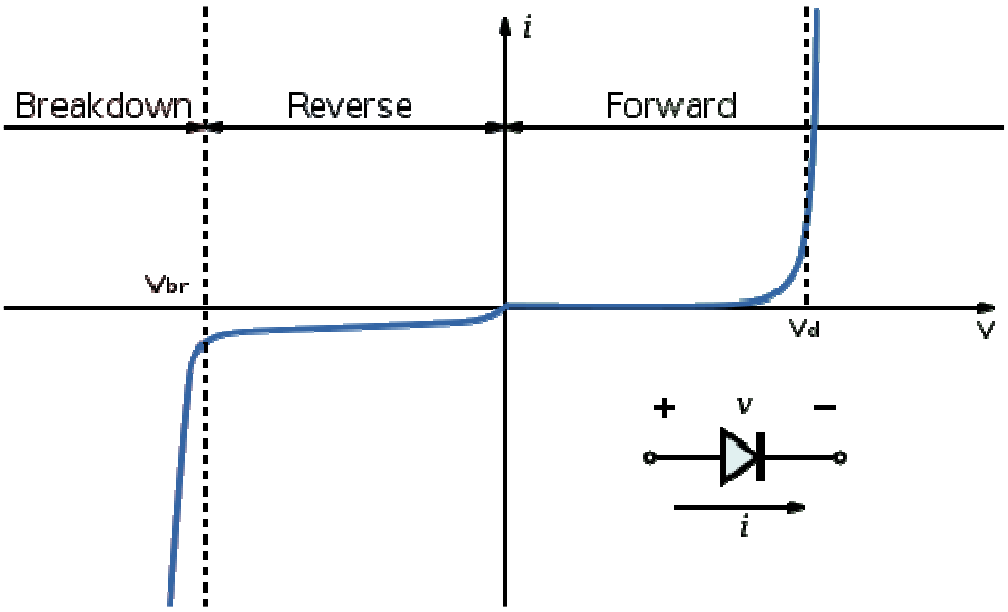
ไดโอดเทียบกับสัญลักษณ์ของไดโอดแบบสารกึ่งตัวนำ (บนสุด) โดยแคบสีดำแสดงฝั่งที่เป็นขั้วแคโทด

ไดโอดชนิดสาร กึ่งตัวนำแบบใหม่ๆ มักจะใช้ผลึกสารกึ่งตัวนำจำพวกซิลิกอนที่ไม่บริสุทธิ์โดยทำการ เจือสารให้เกิดฝั่งลบและฝั่งบวก โดยฝั่งลบจะมีประจุลบคืออิเล็กตรอนมากกว่าเรียกว่า "สารกึ่งตัวนำชนิด n (n-type semiconductor)" ส่วนฝั่งบวกจะมีประจุบวกหรือโฮลเรียกว่า "สารกึ่งตัวนำชนิด p (p-type semiconductor)" โดยไดโอดแบบสารกึ่งตัวนำเกิดมาจากการนำสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดนี้มาติดด้วย วิธีการพิเศษ โดยส่วนที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดอยู่ติดกันนั้นเรียกว่า "รอยต่อ p-n (p-n junction)" ไดโอดชนิดนี้จะยอมให้อิเล็กตรอนไหลผ่านจากสารกึ่งตัวนำชนิด n ไปยังสารกึ่งตัวนำชนิด p เท่านั้น จึงเรียกฝั่งที่มีสารกึ่งตัวนำชนิด n ว่าแคโทด และฝั่งที่มีสารกึ่งตัวนำชนิด p ว่าแอโนด แต่ถ้าพูดถึงทิศทางของกระแสสมมติที่ไหลสวนทางกับกระแสอิเล็กตรอนนั้น จะเห็นว่ากระแสสมติจะไหลจากขั้วแอโนดหรือสารกึ่งตัวนำชนิด p ไปยังขั้วแคโทดหรือสารกึ่งตัวนำชนิด n เพียงทิศทางเดียวเท่านั้น

ไดโอดแบบสารกึ่งตัวนำอีกรูปแบบหนึ่งที่สำคัญก็คือ ไดโอดชอทท์กี้ (Schottky diode) ซึ่งมีหน้าสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำมากกว่ารอยต่อ p-n

คุณลักษณะ เฉพาะของกระแสและแรงดัน

พฤติกรรมของไดโอดแบบสารกึ่งตัวนำในวงจรจะก่อให้เกิดคุณลักษณะ เฉพาะของกระแสและแรงดัน (current-voltage characteristic) หรือเรียกว่ากราฟ I-V (กราฟด้านล่าง) รูปร่างของเส้นโค้งถูกกำหนดจากส่งผ่านประจุผ่านเขตปลอดพาหะ (depletion region หรือ depletion layer) ซึ่งอยู่ใยรอยต่อ p-n



กราฟคุณสมบัติเฉพาะของกระแสและแรงดันของรอยต่อ p-n ของไดโอด

สมการ ของไดโอดชอทท์กี้

สมการของไดโอดชอทท์กี้ในอุดมคติหรือกฎของไดโอด (ชื่อชอทท์กี้ได้มาจากวิลเลียม เบรดฟอร์ด ชอทท์กี้ ผู้ร่วมประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์ "ไม่ใช่"วัล เตอร์ เฮอร์มานน์ ชอทท์กี้ ผู้ประดิษฐ์เทโทรด) ได้ให้สมการที่แสดงถึงกราฟคุณลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดันเอาไว้ว่า

$$I = I_S \left(e^{V_D/(nV_T)} - 1\right),$$

เมื่อ

I คือกระแสที่ไหลผ่านไดโอด

I_S คือกระแสอิ่มตัวเมื่อทำการไบอัสกลับ

V_D คือแรงดันที่ตกคร่อมไดโอด

V_T คือค่าความต่างศักย์อันเนื่องมาจากความร้อน

n คือค่าตัวประกอบอุดมคติ (ideaity factor) หรือค่าตัวประกอบคุณภาพ (quality factor) หรือสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (emission coefficient) ทั้งนี้ค่าตัวประกอบอุดมคติมีค่าอยู่ที่ 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและวัสดุที่นำมาใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ ในหลายกรณีสามารถประมาณค่าเท่ากับ 1 ได้ (ดังนั้นค่า n จึงอาจถูกละไว้)

ค่าความต่างศักย์อันเนื่องมาจากความร้อน(thermal voltage) V_T มีค่าประมาณ 25.85 mV ที่อุณหภูมิ 300 K ซึ่งเป็นอุณหภูมิห้องปฏิบัติการณ์ แต่เราก็สามารถหาค่าดังกล่าวเมื่ออุณหภูมิอื่นๆได้ จากสูตร:

$$V_T = \frac{kT}{q},$$

เมื่อ

k คือค่าคงที่ของโบลต์ซมานน์ มีค่าเท่ากับ $1.3806503 \text{-}23 \times \text{J K}^{-1}$

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ที่รอบต่อ p-n

q คือประจุของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602176487 \text{-}19 \times \text{C}$

สมการของไดโอดชอทท์กี้ในอุดมคติหรือกฎของไดโอดนั้นเกิดมาจากการอ้างสมมติฐานของกระบวนการเกิดการกระแสไฟฟ้าในไดโอดว่า (เนื่องจากสนาม ไฟฟ้า) เป็นการ

ลอยผ่าน, การแพร่, และการรวมความร้อนอีกครั้ง (thermal recombination-generation) นอกจากนี้ยังสันนิษฐานว่ากระแสจากการรวมตัวอีกครั้ง (recombination-generation , R-G) . นเขตปลอดพาหะไม่มีนัยสำคัญใดๆ นั่นหมายความว่าสมการของไดโอดชอทท์กี้ไม่ต้องคำนวณผลของกระบวนการที่เกี่ยว ข้องกับการพังทลายเมื่อกระแสย้อนกลับและโฟตอนที่ช่วยให้เกิด R-G

พฤติกรรมของสัญญาณขนาดเล็ก

ในการออกแบบวงจร แบบจำลองของสัญญาณขนาดเล็กจากพฤติกรรมของไดโอดถูกนำมาใช้งานอยู่บ่อยครั้ง

แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (Small-signal model) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ที่อาศัยการประมาณพฤติกรรมของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ไม่มีความเป็นเชิงเส้นด้วยสมการเชิงเส้น ความเป็นเชิงเส้นนี้ขึ้นอยู่กับจุดไบอัสกระแสตรง (DC bias point) ของอุปกรณ์ (นั่นก็คือระดับของ แรงดัน/กระแส ที่แสดงออกเมื่อไม่มีสัญญาณที่ถูกนำมาใช้) และสามารถทำให้ถูกต้องได้ด้วยการมองที่จุดนี้อีกด้วย

ความต้านทาน

เมื่อใช้สมการชอทท์กี้ไดโอด ค่าความต้านสัญญาณขนาดเล็ก (r_D) ของไดโอดสามารถเข้ามาเกี่ยวกับจุดปฏบัติการณ์ (Q-point) ที่กระแสไบอัสกระแสตรง (I_Q) และแรงดันใช้งานที่จุดปฏิบัติการณ์ (V_Q)[9] แรกเริ่มเดิมทีค่าความนำสัญญาณขนาดเล็ก (g_D) ถูกตั้งขึ้น นั่นคือประจุไฟฟ้าในกระแสไฟฟ้าที่ไหลในไดโอดที่เกิดมาจากการเปลี่ยนแปลง เล็กๆ ของแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดหารด้วยแรงดันตกคร่อมไดโอดนั้น ดังสมการ

$$g_D = \frac{dI}{dV}\Big|_Q = \frac{I_0}{V_T} e^{V_Q/V_T} \approx \frac{I_Q}{V_T}$$

การประมาณค่าเกิดมาจากการอนุมานว่ากระแสไบอัส I_Q นั้นมากพอที่จะทำให้ค่าตัวประกอบ (factor) ของส่วนที่ละเลยได้จากสมการชอทท์กี้มีค่าเท่า 1 โดยการประมาณนี้มีความถูกต้องแม้แรงดันจะมีค่าต่ำ เพราะแรงดันอันเนื่องมาจากความร้อน (thermal voltage) $V_T \approx 26\,\mathrm{mV}$ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน (27 องศาเซลเซียส) ดังนั้น V_Q / V_T มีแนวโน้มมากขึ้น หมายความว่าตัวชี้กำลังมีค่าสูงมาก

แต่ไม่ใช่กับค่าความต้านทานสัญญาณขนาดเล็ก r_D ซึ่งเป็นส่วนกลับของค่าความนำสัญญาณขนาดเล็ก ค่าความต้านทานสัญญาณขนาดเล็กไม่ขึ้นอยู่กับไฟฟ้ากระแสสลับ แต่จะขึ้นอยู่กับไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น ดังสมการ

$$r_D = \frac{V_T}{I_Q}$$

ความเก็บประจุ

ประจุไฟฟ้าจะนำพากระแสไฟฟ้า I_Q ตามสูตร

$$Q = I_Q \mathsf{T}_F + Q_J$$

เมื่อ T_F คือเวลาที่ประจุเคลื่อนที่ไป:[9] ส่วนแรกคือประจุที่เคลื่อนที่ผ่านไดโอดแล้วเกิดกระแส I_Q ไหลผ่านไดโอด ที่ ส่วนที่สองคือประจุที่เก็บสะสมอยู่ที่รอยต่อ p-n จึงมีคุณลักษณะคล้ายกับตัว ต้านทานง่ายๆ มีคู่ขั้วทางไฟฟ้าที่มีประจุตรงข้ามกัน ประจุนั้นถูกกักเก็บที่ไดโอดอาศัยแค่แรงดันที่ตกคร่อมตัวมันเพียงแค่นั้น โดยไม่คำนึงถึงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน

การหาค่าความเก็บประจุของไดโอด C_D หาได้จากสมการ

$$C_D = \frac{dQ}{dV_Q} = \frac{dI_Q}{dV_Q}\tau_F + \frac{dQ_J}{dV_Q} \approx \frac{I_Q}{V_T}\tau_F + C_J$$

เมื่อ $C_J = \frac{dQ_J}{dV_D}$ คือค่าความเก็บประจุที่รอยต่อ p-n โดยประจุในส่วนแรกเรียกว่า *ค่าความ เก็บประจุแพร่* (diffision capacitance) เพราะเกี่ยวข้องกับกระแสที่แพร่ตรงรอยต่อของไดโอด

การฟื้นตัวกลับ

ช่วงท้ายของการไบอัสตรงของไดโอดแบบสารกึ่งตัวนำ จะเกิดกระไหลไฟฟ้าที่ไหลย้อนกลับในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ตัวอุปกรณ์จะยังไม่สามารถป้องกันกระแสไหลย้อนกลับได้เต็มที่จนกระทั่งกระแส ที่เกิดไหลย้อนกลับนั้นได้สิ้นสุดลง[10]

ผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้นมีความสลักสำคัญเมื่อมีการสวิตชิ่ง (switching) ของกระแสที่สูงและรวดเร็วมาก (di/dt มีค่า 100 A/μs หรือมากกว่านั้น)[11] ค่าที่แน่นอนของ "เวลาฟื้นตัวกลับ (reverse recovery time)" t_r (อยู่ในช่วงเวลาเป็นนาโนวินาที) อาจจะเคลื่อนย้าย "ประจุฟื้นตัวกลับ (reverse recovery charge)" Q_r (อยู่ในช่วงนาโนคูลอมป์) ออกจากไดโอด ในระยะเวลาระหว่างฟื้นตัวนี้ไดโอดจะสามารถทำงานในทิศทางตรงข้ามได้ แน่นอนว่าในความเป็นจริงผลกระทบนี้มีความสำคัญในการพิจารณาความสูญเสียที่ เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากไดโอดไม่เป็นอุดมคติ[12] อย่างไรก็ตามอัตราการแกว่ง (slew rate) ของกระแสไฟฟ้านั้นรุนแรงมาก (di/dt มีค่า 10 A/μs หรือนอ้ยกว่านั้น) ผลกระทบนี้ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยจึงละเลยไว้ได้[13] ในการใช้งานไดโอดส่วนใหญ่จึงไม่มีผลกระทบที่สำคัญมากนัก

กรณีที่กระแสไหลย้อนกลับอย่างฉับพลันเมื่อประจุไฟฟ้าที่ถูกเก็บสะสมปลอด พาหะแล้วจะนำไปใช้ประโยชน์ในขั้นตอนการฟื้นตัวของไดโอดสำหรับกำเนิดสัญญาณ พัลส์สั้นโดยเฉพาะ

ประเภทของไดโอดแบบสารกึ่งตัวนำ

ไดโอดเปล่งแสงหรือแอลอีดี(Light Emitting Diode ; LED)

LED เป็นไดโอดที่ใช้สารประเภทแกลเลี่ยมอาร์เซ็นไนต์ฟอสไฟต์ (Gallium Arsenide Phosphide ; GaAsP) หรือสารแกลเลี่ยมฟอสไฟต์ (Gallium Phosphide ; GaP) มาทำเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n แทนสาร Si และ Ge สารเหล่านี้มีคุณลักษณะพิเศษ คือ สามารถเรืองแสงได้เมื่อได้รับไบอัสตรง การเกิดแสงที่ตัว LED นี้เราเรียกว่า อิเล็กโทรลูมินิเซนต์ (Electroluminescence) ปัจจุบันนิยมใช้ LED แสดงผลในเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ เช่น เครื่องคิดเลข, นาฬิกา เป็นต้น

โฟโตไดโอด (Photo Diode)

โฟโตไดโอด เป็นไดโอดที่อาศัยแสงจากภายนอกผ่านเลนซ์ ซึ่งฝังตัวอยู่ระหว่างรอยต่อ p-n เพื่อกระตุ้นให้ไดโอดทำงาน การต่อโฟโตไดโอดเพื่อใช้งานจะเป็นแบบไบอัสกลับ ทั้งนี้เพราะไม่ต้องการให้โฟโตไดโอดทำงานในทันทีทันใด แต่ต้องการให้ไดโอดทำงานเฉพาะเมื่อมีปริมาณแสงสว่างมากพอตามที่กำหนดเสีย ก่อน กล่าวคือ เมื่อเลนซ์ของโฟโตไดโอดได้รับแสงสว่างจะเกิดกระแสรั่วไหล ปริมาณกระแสรั่วไหลนี้เพิ่มขึ้นตามความเข้มของแสง

ไดโอดกำลัง (Power Diode)

ไดโอดกำลังเป็นไดโอดที่ออกแบบให้บริเวณรอยต่อมีช่วงกว้างมากกว่าไดโอดทั่วไป เพื่อนำไปใช้กับงานที่มีกำลังไฟฟ้าสูง กระแสสูงและทนต่ออุณหภูมิสุงได้ เช่น ประกอบเป็นวงจรเรียงกระแสในอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นต้น จะเห็นได้ว่าเมื่อพิกัดกระแสไฟฟ้ามีค่าหลายร้อยแอมป์ ทำให้ไดโอดมีอุณหภูมิขณะทำงานสูง โดยทั่วไปจึงนิยมใช้ร่วมกับตัวระบายความร้อน (Heat Sinks)เพื่อเพิ่มพื้นที่ระบายความร้อนภายในตัวไดโอดกำลัง

ไดโอดวาแรกเตอร์หรือวาริแคป (Varactor or Varicap Diode)

ไดโอดวาแรกเตอร์หรือวาริแคปเป็นไดโอดที่มีลักษณะพิเศษ คือ สามารถปรับค่าคาปาซิแตนซ์เชื่อมต่อ (Ct) ได้โดยการปรับค่าแรงดันไบอัสกลับ ไดโอดประเภทนี้มีโครงสร้างเหมือนกับไดโอดทั่วไป ขณะแรงดันไบอัสกลับ (Reverse Bias Voltage ; Vr) มีค่าต่ำ Depletion Region จะแคบลงทำให้ Ct ครงรอบต่อมีค่าสูง แต่ในทางตรงข้ามถ้าเราปรับ Vr ให้สูงขึ้น Depletion Region จะขยายกว้างขึ้น ทำให้ Ct มีค่าต่ำ จากลักษณะดังกล่าว เราจึงนำวาริแคปไปใช้ในวงจรปรับความถี่ เช่น วงจรจูนความถี่อัตโนมัติ (Automatic Fine Tunning ; AFC) และวงจรกรองความถี่ซึ่งปรับช่วงความถี่ได้ตามต้องการ (Variable Bandpass Filter) เป็นต้น

ซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode)

ซีเนอร์ไดโอดเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่นำกระแสได้เมื่อได้รับไบอัสกลับ และระดับแรงดันไบอัสกลับที่นำซีเนอร์ไดโอดไปใช้งานได้เรียกว่า ระดับแรงดันพังทลายซีเนอร์ (Zener Breakdown Voltage ; Vz) ซีเนอร์ไดโอดจะมีแรงดันไบอัสกลับ (Vr)น้อยกว่า Vz เล็กน้อย ไดโอดประเภทนี้เหมาะที่จะนำไปใช้ควบคุมแรงดันที่โหลดหรือวงจรที่ต้องการแรง ดันคงที่ เช่น ประกอบอยู่ในแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง หรือโวลเทจเรกูเลเตอร์

ไดโอดในทางอุดมคติ

ไดโอดในอุดมคติ (Ideal Diode) มีลักษณะเหมือนสวิตช์ที่สามารถนำกระแสไหลผ่านได้ในทิศทางเดียว ถ้าต่อขั้วแบตเตอรี่ให้เป็นแบบไบอัสตรงไดโอดจะเปรียบเป็นเสมือนกับสวิตช์ที่ปิด (Close Switch) หรือไดโอดลัดวงจร (Short Circuit) Id ไหลผ่านไดโอดได้ แต่ถ้าต่อขั้วแบตเตอรีแบบไบอัสกลับ ไดโอดจะเปรียบเป็นเสมือนสวิตช์เปิด (Open Switch) หรือเปิดวงจร (Open Circuit) ทำให้ Id เท่ากับศูนย์

ไดโอดในทางปฏิบัติ

ไดโอดในทางปฏิบัติ (Practical Diode) มีการแพร่กระจายของพาหะส่วนน้อยที่บริเวณรอยต่ออยู่จำนวนหนึ่ง ดังนั้น ถ้าต่อไบอัสตรงให้กับไดโอดในทางปฏิบัติก็จะเกิด แรงดันเสมือน (Ge >= 0.3V ; Si >= 0.7V) ซึ่งต้านแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเพื่อการไบอัสตรง ขนาดของแรงดันเสมือนจึงเป็นตัวบอกจุดทำงาน ดังนั้น จึงเรียก "แรงดันเสมือน" อีกอย่างหนึ่งว่า "แรงดันในการเปิด" (Turn-on Voltage ; Vt)

กรณีไบอัสกลับ เราทราบว่า Depletion Region จะขยายกว้างขึ้น แต่ก็ยังมีพาหะข้างน้อยแพร่กระจายที่รอยต่ออยู่จำนวนหนึ่ง แต่ก็ยังมีกระแสรั่วไหลอยู่จำนวนหนึ่ง เรียกว่า กระแสรั่วไหล (Leakage Current) เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นเรื่อยๆ กระแสรั่วไหลจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ไดโอดนำกระแสเพิ่มขึ้นมาก ระดับกระแสที่จุดนี้ เรียกว่า "กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ" (Reverse Saturation Current ; Is) แรงดันไฟฟ้าที่จุดนี้ เรียกว่า แรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) และถ้าแรงดันไบอัสสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ไดโอดทนได้ เราเรียกว่า "แรงดันพังทลายซีเนอร์" (Zener Breakdown Voltage ; Vz) ถ้าแรงดันไบอัสกลับสูงกว่า Vz จะเกิดความร้อนอย่างมากที่รอยต่อของไดโอด ส่งผลให้ไดโอดเสียหายหรือพังได้ แรงดันไฟฟ้าที่จุดนี้เราเรียกว่า แรงดันพังทลายอวาแลนซ์ (Avalance Breakdown Voltage) ดังนั้น การนำไดโอดไปใช้งานจึงใช้กับการไบอัสตรงเท่านั้น

ผล กระทบของอุณหภูมิ (Temperature Effects)

จากการทดลองพบว่า Is ของ Si จะมีค่าเพิ่มขึ้นเกือบ 2 เท่า ทุกๆ ครั้งที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส ขณะที่ Ge มีค่า Is เป็น 1 หรือ 2 ไมโครแอมป์ ที่ 25 องศาเซลเซียส แต่ที่ 100 องศาเซลเซียสจะมีค่า Is เพิ่มขึ้นเป็น 100 micro-amp ระดับกระแสไฟฟ้าขนาดนี้จะเป็นปัญหาต่อการเปิดวงจรเรื่องจากได้รับการไบอัส กลับ เพราะแทนที่ Id จะมีค่าใกล้เคียงศูนย์ แต่กลับนำกระแสได้จำนวนหนึ่งตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

ทรานซิสเตอร์ (Transister)

ประวัติความเป็นมาของทรานซิสเตอร์

ในช่วงเวลาก่อนปี พ.ศ. 2490 ประมาณ 40 ปี หลอดสุญญากาศเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการพัฒนาและนำมาใช้งานมากที่สุด การใช้งานหลอดสุญญากาศมีปัญหาในการใช้งานมากเช่น กำลังไฟฟ้าสูญเสียมาก มีขนาดใหญ่ ชำรุดง่าย กรรมวิธีผลิตยุ่งยาก เป็นต้น เมื่อความต้องการใช้งานมากขึ้นหลอด สุญญากาศยิ่งมีปัญหามากขึ้น จึงได้มีผู้คิดค้นสิ่งประดิษฐ์ใหม่ๆ ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มาใช้งานแทนหลอดสุญญากาศ

ในปลายปี พ.ศ. 2490 บริษัทเบลล์เทเลโฟนจำกัด (Bell Telephone CO.,LTD.) โดย จอห์น บาร์ดีน (John Bardeen) วิลเลียม แบรดฟอร์ ช็อคเลย์ (William Bradford Shockly) และวอลเตอร์ ฮอร์ส แบรทเทน (Walter House Bratain) ได้ทดลองวงจรขยายด้วยทรานซิสเตอร์ตัวแรกที่ห้องทดลองของบริษัทเบลล์เทเลโฟน เป็นสำเร็จ ทรานซิสเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเมื่อเปรียบเทียบกับหลอดสุญญากาศก็ คือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ไม่ต้องมีตัวให้ความร้อน มีโครงสร้างแข็งแรงทนทาน กำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อย ประสิทธิภาพสูง สามารถทำงานได้ทันทีเมื่อจ่ายไฟให้

ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์เซมิคอนดัคเตอร์ชนิดไบโพล่าร์ ซึ่งความหมายของไบโพล่าร์ คือ อุปกรณ์หลายขั้วต่อ ทรานซิสเตอร์ได้จากการนำเอาสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็นมาต่อเรียงกัน

2. ชนิดของทรานซิสเตอร์

การแบ่งชนิดของทรานซิสเตอร์สามารถแบ่งออกได้หลายวิธีแล้วแต่ผู้ผลิตว่าการ แบ่งชนิดของทรานซิสเตอร์จะยึดถือรูปลักษณ์แบบไหน ถ้าแบ่งในรูปของการใช้งานก็จะแบ่งออกเป็น ทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่สวิทชิ่ง ทรานซิสเตอร์กำลัง ทรานซิสเตอร์ความถี่สูง ฯลฯ การ

แบ่งอีกวิธีหนึ่งซึ่งนิยมใช้กันมากในยุคแรกๆ คือ การแบ่งโดยใช้สารที่นำมาสร้างเป็นเกณฑ์ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภทคือ

2.1 เยอรมันเนียมทรานซิสเตอร์ (Germanium transistor) เป็นทรานซิสเตอร์ยุคแรกๆ และเป็นชนิดที่มีกระแสรั่วไหลมากจึงไม่ค่อยมีผู้นิยมใช้

2.2 ซิลิกอนทรานซิสเตอร์ (Silicon Transistor) เป็นทรานซิสเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง มีกระแสรั่วไหลน้อย (Leakage Current) เป็นทรานซิสเตอร์ที่ใช้กันมากในยุคปัจจุบัน

3. โครงสร้างและสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์

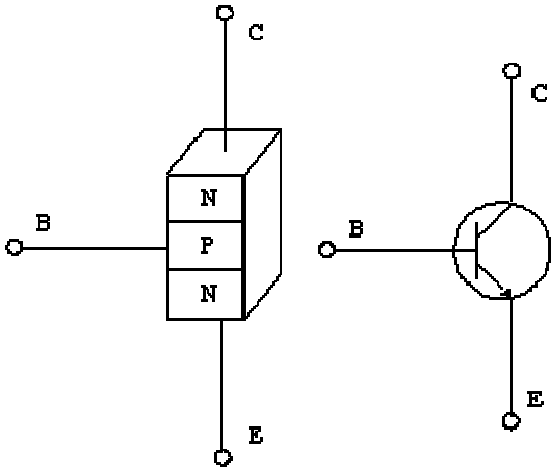
เนื่องจากทรานซิสเตอร์ถูกสร้างขึ้นมาจากสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P) และเอ็น (N) ซึ่งนำมาต่อกัน 3 ชิ้น ทำให้เกิดรอยต่อขึ้นระหว่างเนื้อสาร 2 รอยต่อ หรือเรียกว่าจังชั่น (Junction) โดยที่สารที่อยู่ตรงกลางจะเป็นคนละชนิดกับสารที่อยู่หัวและท้าย มีขาต่อออกมาสำหรับนำไปใช้งาน 3 ขา ดังนั้นทรานซิสเตอร์จึงแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามโครงสร้างของสารที่นำมาใช้คือ

1. ทรานซิสเตอร์ชนิด พี เอ็น พี (PNP)

2. ทรานซิสเตอร์ชนิด เอ็นพีเอ็น (NPN)

ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN

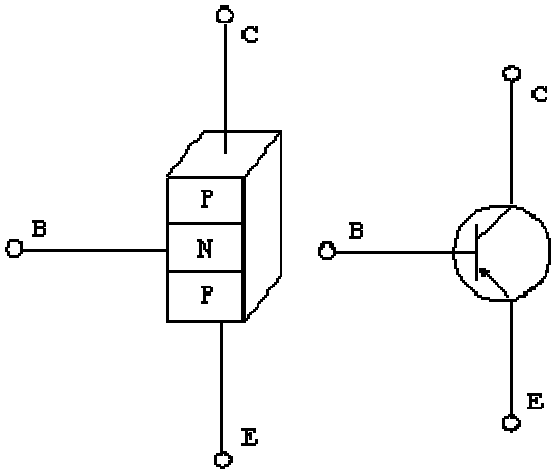
เป็นทรานซิสเตอร์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิด N ชนิด P และชนิด N มาต่อเรียงกันตามลำดับ แล้วต่อสายออกมา 3 สาย เพื่อเป็นขาต่อกับวงจรสารกึ่งตัวนำชนิด P ซึ่งอยู่ ตรงกลางจะเป็นจุดร่วม สารกึ่งตัวนำชนิด N จะทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนซึ่งจะไหลเป็นกระแสในวงจรส่วนนี้เราเรียกว่า อิมิตเตอร์ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านสารกึ่งตัวนำชนิด P ซึ่งเราเรียกว่าเบสส่วนเบสนี้จะเป็นตัวคอยควบคุมอิเล็กตรอนให้ไหลไปยังสาร กึ่งตัวนำชนิด N ถัดไปได้มากหรือน้อยอิเล็กตรอนส่วนที่ผ่านเบสมาก็จะเคลื่อนที่มายังสารกึ่ง ตัวนำชนิด N ซึ่งเราเรียกว่าคอลเลคเตอร์ และกลายเป็นกระแสไหลในวงจรภายนอกต่อไป



รูป ที่ 1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN

ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP

คือทรานซิสเตอร์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิดพี ชนิดเอ็น และชนิดพี มาเรียงกันตามลำดับแล้วต่อสายจากแต่ละชิ้นส่วนออกมาเป็น 3 สายเพื่อต่อกับวงจรสารกึ่งตัวนำเอ็นจะเป็นจุดร่วม



รูป ที่ 2 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ชนิด PNP

4. ขาของทรานซิสเตอร์

1. ขาคอลเลคเตอร์ (Collector) เรียกย่อๆ ว่าขา C เป็นขาที่มีโครงสร้างในการโด๊ปสารใหญ่ที่สุด

2. ขาอิ มิตเตอร์ (Emitter) เรียกย่อๆ ว่าขา E เป็นขาที่มีโครงสร้างใหญ่รองลงมาและจะอยู่คนละด้านกับขาคอลเลคเตอร์

3. ขา เบส (Base) เรียกย่อๆ ว่าขา B เป็นส่วนที่อยู่ตรงกลางระหว่าง C และ E มีพื้นที่ของโครงสร้างแคบที่สุดเมื่อเทียบกับอีก 2 ส่วน เมื่อจำแนกลักษณะการต่อตัวทรานซิสเตอร์จึงคล้ายกับการนำเอาไดโอด 2 ตัวมาต่อกัน

5. การทำงานของทรานซิสเตอร์

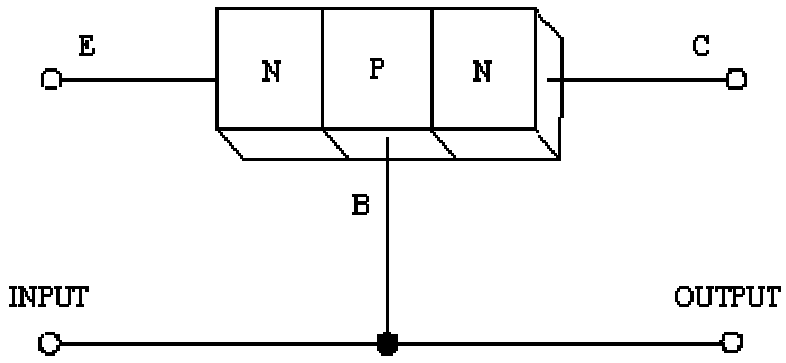
จากการศึกษาเกี่ยวกับการไหลของกระแสภายในวงจรสารกึ่งตัวนำ การที่เราจะทำให้เกิดการไหลของกระแสหรือให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้นั้น จำเป็นจะต้องให้ไบอัสและกระแสที่ปรากฏทางด้านเอาท์พุทเราต้องสามารถควบคุม ค่าของกระแสได้ด้วยจึงจะทำให้ทรานซิสเตอร์ขยายสัญญาณได้ตามความต้องการ

การอธิบายการทำงานของทรานซิสเตอร์จำเป็นจะต้องเข้าใจการไหลในรูปของโฮลและอิเล็กตรอน รวมถึงการไบอัสด้วยซึ่งการไบอัสเป็นวิธีการที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์พร้อมที่ จะทำงานนั่นเอง ในกรณีของทรานซิสเตอร์มี 3 ขา การป้องกันแรงเคลื่อนที่เหมาะสมหรือไบอัสที่ถูกต้องจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของทรานซิสเตอร์แล้วจะสามารถจัดรูปแบบการขยายสัญญาณโดยต้องมีอินพุทและเอาท์พุท เมื่อให้ขาหนึ่งเป็นอินพุทขาหนึ่งเป็นเอาท์พุท ขาที่เหลือก็จะต้องเป็นจุดร่วม (Common) อินพุทกับเอาท์พุท จากหลักการดังกล่าวเรากำหนดให้ระหว่าง B กับ E เป็น

อินพุท (Input) และระหว่าง B กับ C เป็นเอาท์พุท (Out put) ดังนั้นจะสามารถจัดรูปแบบ การขยายได้ 3 แบบหรือ 3 คอมมอน

เนื่องจากวัตถุประสงค์ของทรานซิสเตอร์สร้างมาจากหลักการที่ต้องการให้กระแสทางด้านอินพุทไปควบคุมกระแสเอาท์พุท ดังนั้นจะต้องไบอัสทางด้านเอาท์พุทเป็นไบอัสแบบย้อนกลับ (Reverse Bias) ถ้าให้ไบอัสตรงจะทำให้ทางด้านเอาท์พุทเป็นอิสระไม่ครบวงจรเอาท์พุท ทางด้านอินพุทจะให้ไบอัสตรง (Forward Bias) และแรงเคลื่อนที่มาไบอัสนี้ไม่จำเป็นจะต้องเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีค่าสูง แต่อย่างไร เพราะถ้าให้กระแสอินพุทสูงเกินไปจะทำให้กระแสเอาท์พุทเกิดการอิ่มตัว



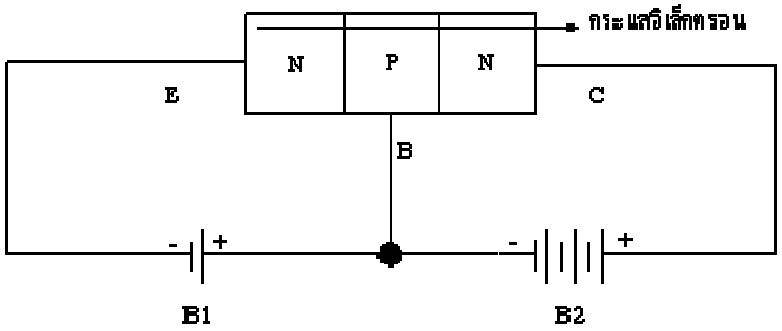
รูป ที่ 3 การจัดอินพุทและเอาท์พุท

6. การให้ไบอัสทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์ทั้งชนิด NPN และ PNP เมื่อนำไปใช้งานไม่ว่าจะใช้ในวงจรขยายสัญญาณหรือทำงานเป็นสวิตช์จะต้องทำการจัดแรงไฟให้ เหมาะสมหรือเรียกว่าการให้ไบอัส (Bias) ให้ทรานซิสเตอร์ก่อน ทรานซิสเตอร์จึงจะทำงานได้โดยใช้หลักการไบอัสดังนี้

1. ไบอัส ตรง (Forward Bias) ให้กับรอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์กับเบส
2. ไบอัส กลับ (Reverse Bias) ให้กับรอยต่อระหว่างคอลเลคเตอร์กับเบส

การให้ไบอัสทรานซิสเตอร์ชนิด NPN



รูป ที่ 4 การให้ไบอัสของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN

จาก วงจร

B_1 และ B_2 เป็นแรงดันไฟฟ้าป้อนเป็นไบอัสให้ขาต่างๆ ของทรานซิสเตอร์ NPN

B_1 เป็นไบอัสตรงระหว่าง B-E ความต้านทานระหว่าง B-E จะต่ำมาก

B_2 เป็นไบอัสกลับระหว่าง B-C ความต้านทานระหว่าง B-C จะสูงมาก

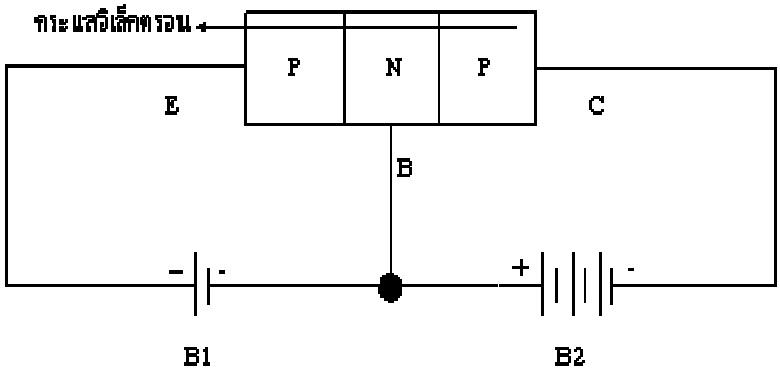
ฉะนั้นกระแสอิเล็กตรอนจะไหลในวงจร B-E ครบวงจรและอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด N จะเข้า ประจุในสาร P ทันทีทันใด จึงเกิดแรงดันผลักดันให้อิเล็กตรอนเลื่อนตัวไปขา C กระแสอิเล็กตรอนจะผ่าน B_1-B_2 ครบวงจรทางขา E

จากรูปที่ 4 สำหรับทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ก็เช่นกัน การให้ไบอัสทางด้านอินพุทเป็นแบบฟอร์เวิร์ดไบอัสให้ไบอัสทางเอาท์พุทเป็นแบบ รีเวิร์สไบอัส ในลักษณะเช่นนี้ถ้าใช้กระแสนิยมเป็นก็จะได้ทิศทางการไหลของกระแสทางอินพุท จากขาเบสไปยังอีมิตเตอร์ อย่างไรก็ตามเราได้ทราบแล้วว่าที่ขาเบสนั้นถูกโด๊ปไว้แคบมากจึงทำให้ประจุ ส่วนใหญ่ไม่สามารถที่จะไหลไปได้ จะต้องให้รีเวิร์สไบอัสระหว่างเบสกับคอ ลเลคเตอร์เป็นบวกมากๆ เพื่อผลักประจุเหล่านี้ให้เคลื่อนที่ไปยังอีมิตเตอร์ เช่นเดียวกันถ้าดูจากทิศทางการไหลของกระแสแล้วสามารถสรุปได้ว่า

$$I_E = I_B + I_C$$

การไล่ทิศทางการไหลของกระแสอีกแบบหนึ่งซึ่งนิยมไล่จากขั้วลบไปหาขั้วบวกซึ่ง เราเรียกว่า การไล่แบบกระแสอิเล็กตรอนนั้น ทิศทางของกระแสจะทวนหัวลูกศรของสัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์ แต่ผลที่ออกมาจะเหมือนกันทุกประการทั้งนี้เพราะการไหลของกระแส ไบโพล่าร์ก็คือ การแลกเปลี่ยนประจุกันระหว่างโฮลกับอิเล็กตรอนนั่นเอง

การให้ไบอัสทรานซิสเตอร์ชนิด PNP



รูปที่ 5 การให้ไบอัสทรานซิสเตอร์ชนิด PNP

จากวงจร

B_1 และ B_2 เป็นแรงดันไฟฟ้าป้อนเป็นไบอัสให้ขาต่างๆ ของทรานซิสเตอร์ PNP

B_1 เป็นไบอัสตรงระหว่าง B-E ความต้านทานระหว่าง B-E จะต่ำมาก

B_2 เป็นไบอัสกลับระหว่าง B-C ความต้านทานระหว่าง B-C จะสูงมาก

ฉะนั้นกระแสอิเล็กตรอนจะไหลในวงจร B ไป E สนามไฟฟ้าลบใน N จึงลดต่ำลง อิเล็กตรอนจากขา C จึงผ่าน B ไป E ผ่าน B_2-B_1 ครบวงจร ลักษณะการทำงานในตัวของ

ทรานซิสเตอร์ PNP คล้ายกับหลุมหรือโฮลทางขา E วิ่งผ่าน B ไปยังขา C รับเอาอิเล็กตรอนหรือไฟ ลบจาก B_1 จึงทำให้เกิดกระแสอิเล็กตรอนไหลครบ วงจร

จากรูปที่ 5 เมื่อให้เบสกับอิมิตเตอร์ได้รับไบอัสแบบฟอร์เวิร์ด ทำให้มีกระแสไหลจากอีมิตเตอร์ไปยังเบส (ตามทิศทางหัวลูกศร) ซึ่งเราเรียก ว่า กระแสเบส ย่อด้วย I_B กระแสที่ไหลมีค่าประมาณ 2-5 % ของค่ากระแสทั้งหมด เนื่องจากที่ขาเบสนั้นสารที่โด๊ปมีพื้นที่น้อยมากจึงทำให้ประจุจำนวนมากของ โฮลมารออยู่ที่ขาเบส ถ้าให้ไบอัสระหว่างเบสกับคอ ลเลคเตอร์แบบรีเวิร์สมากๆ จะทำให้มีกระแสไหลจากคอลเลคเตอร์ไปยังอีมิตเตอร์ได้ เรียกว่า กระแสคอลเลคเตอร์ ย่อด้วย I_C กระแสที่ไหลจะมีค่าประมาณ 95-98 % ของกระแสทั้งหมดซึ่งสามารถสรุปได้ว่า

$$\mathbf{I_E = I_C + I_B}$$

I_E คือ กระแสอีมิตเตอร์มีค่าเท่ากับ 100 %

I_C คือ กระแสคอลเลคเตอร์ มีค่าเท่ากับ 95-98 %

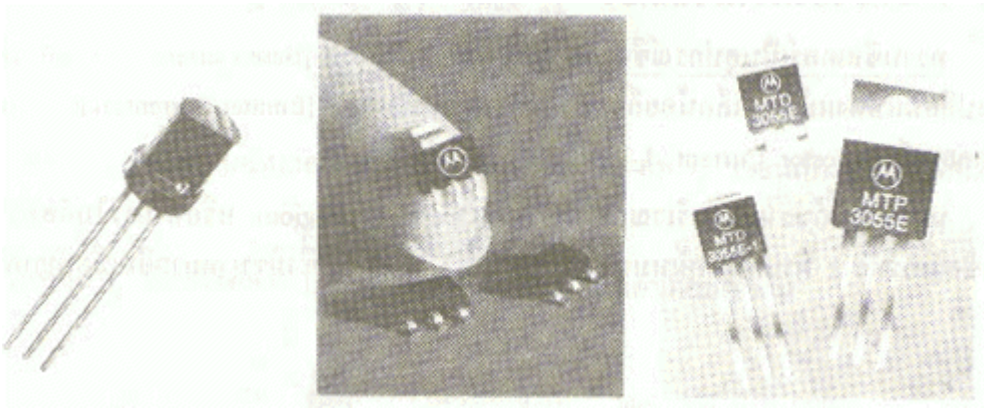
I_B คือ กระแสเบส มีค่าเท่ากับ 2-5 %

V_{BE} คือ แรงไฟไบอัสหรือศักย์ตก คร่อมระหว่างเบสกับอีมิตเตอร์ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ ทำงานปกติ

Bias ของเยอรมันเนียมทรานซิสเตอร์มีค่า 0.2-0.3 โวลท์

Bias ของซิลิคอนทรานซิสเตอร์ มีค่า 0.6-0.7 โวลท

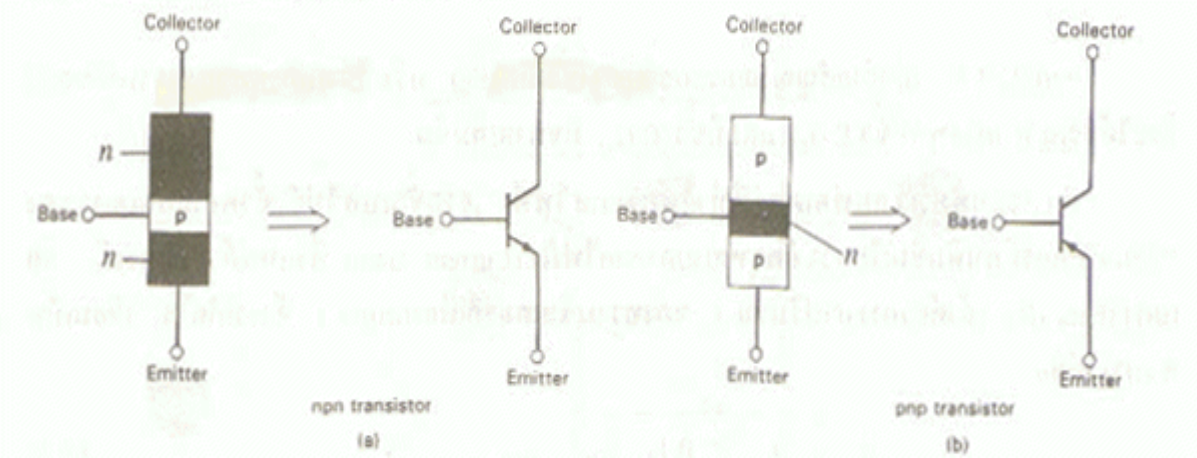
ทรานซิสเตอร์ (TRANSISTORS)



ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ pn จำนวน 2 ตำแหน่ง จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ (Bipolar Junction Transistor(BJT))

ประเภทของทรานซิสเตอร์ (Type of Transistors)

ทรานซิสเตอร์แบ่งตามโครงสร้างได้ 2 ประเภท คือ ทรานซิสเตอร์แบบ npn (npnTransistor) และทรานซิสเตอร์แบบ pnp (pnp Transistor)



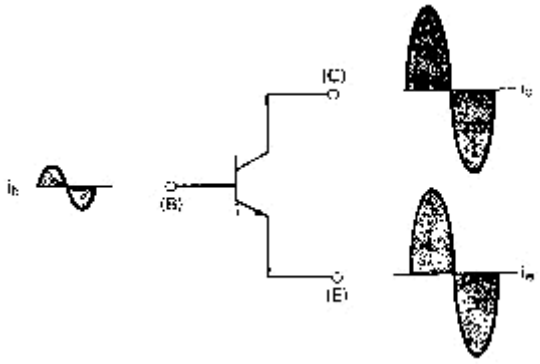
ทรานซิสเตอร์แบบ npn ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด n จำนวน 2 ชิ้นต่อเชื่อมกับสารกึ่งตัวนำชนิด p จำนวน 1 ชิ้น แสดงสัญลักษณ์เป็นดังรูป ทรานซิสเตอร์แบบ pnp ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด p จำนวน 2 ชิ้นต่อเชื่อมกับสารกึ่งตัวนำชนิด n จำนวน 1 ชิ้น แสดงสัญลักษณ์เป็นดังรูป

กระแสและแรงดันของทรานซิลเตอร์ (TransistorCurrent and Voltage)

เนื่องจากทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีขั้ว 3 ขั้ว คือ ขั้วคอลเลคเตอร์ (Collector), ขั้วเบส (ÚBase;B) และขั้วอิมิเตอร์ (Emitter;E) จึงมีกระแสและแรงดันทรานซิสเตอร์หลายค่า ดังนี้

กระแสของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ซึ่งถูกควบคุมด้วยกระแสเบส [Base Current; IB] กล่าวคือ เมื่อ IB มีการเปลี่ยนแปลงแม้เพียง เล็กน้อยก็จะทำให้กระแสอิมิเตอร์ [Emitter Current; IE] และกระแสคอลเลคเตอร์ [Collector Current; IC] เปลี่ยนแปลงไปด้วย นอกจากนี้ถ้าเราเลือกบริเวณการทำงาน (Operating Region) หรือทำการไบอัสที่รอยต่อของทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 ตำแหน่ง ให้เหมาะสม ก็จะได้ IE และ IC ซึ่งมีขนาดมากขึ้นเมื่อเทียบกับ IB



จากรูป เมื่อจ่ายสัญญาณกระแส ac ที่ขั้วเบส (ib) หรือที่ด้านอินพุตของทรานซิสเตอร์ก็จะได้รับสัญญาณเอาต์พุตที่ขั้ว E (ie) และที่ขั้ว C (ic) มีขนาดเพิ่มขึ้น ตัวประกอบหรือแฟกเตอร์ทีทำให้กระแสไฟฟ้า จากขั้วเบสไปยังขั้วคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเรียกว่า อัตราขยายกระแสไฟฟ้า (Current Gain) ซึ่งแทนด้วยอักษรกรีก คือ เบตา (Beta) ถ้าต้องการหาปริมาณ IC ของทรานซิสเตอร์ ก็เพียงแต่คูณ IB ด้วยพิกัด Beta

เขียนเป็นสมการได้คือ

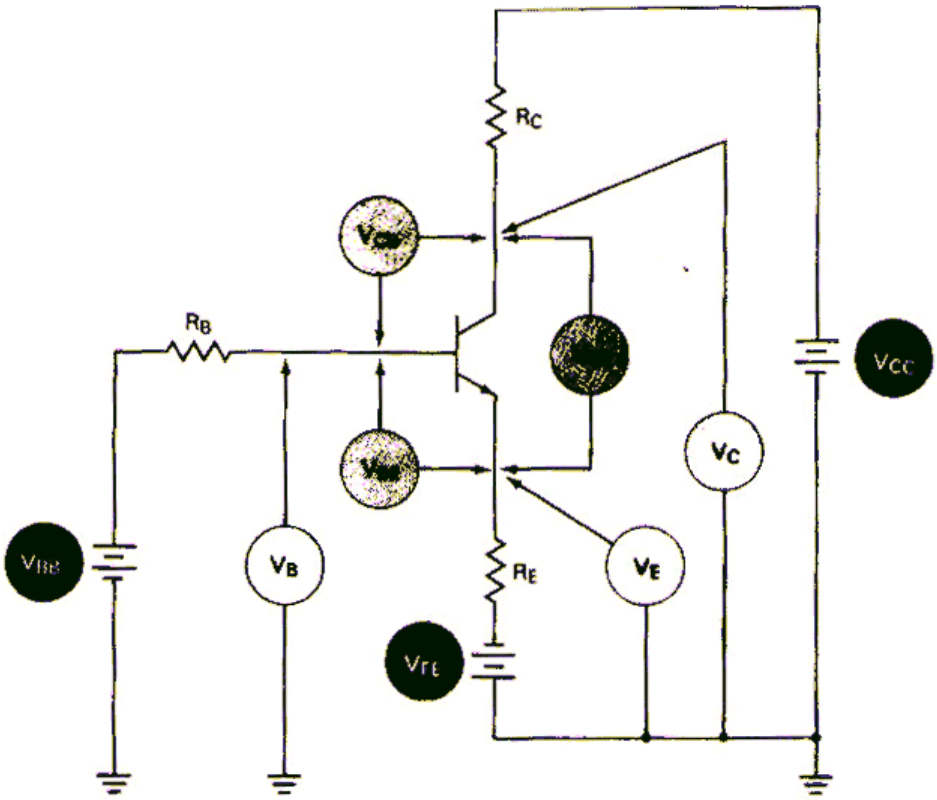
IC = Beta* IB **สมการที่ 1**

IE = IB + IC **สมการที่ 2-a**

IC ~ IE **สมการที่ 2-b**

แรงดันของทรานซิสเตอร์

ขณะต่อทรานซิสเตอร์เพื่อใช้กับงานจริง มีแรงดันไฟฟ้าหลายประการเกิดขึ้น ดังนี้



VCC , VEE, และVBB เป็นแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

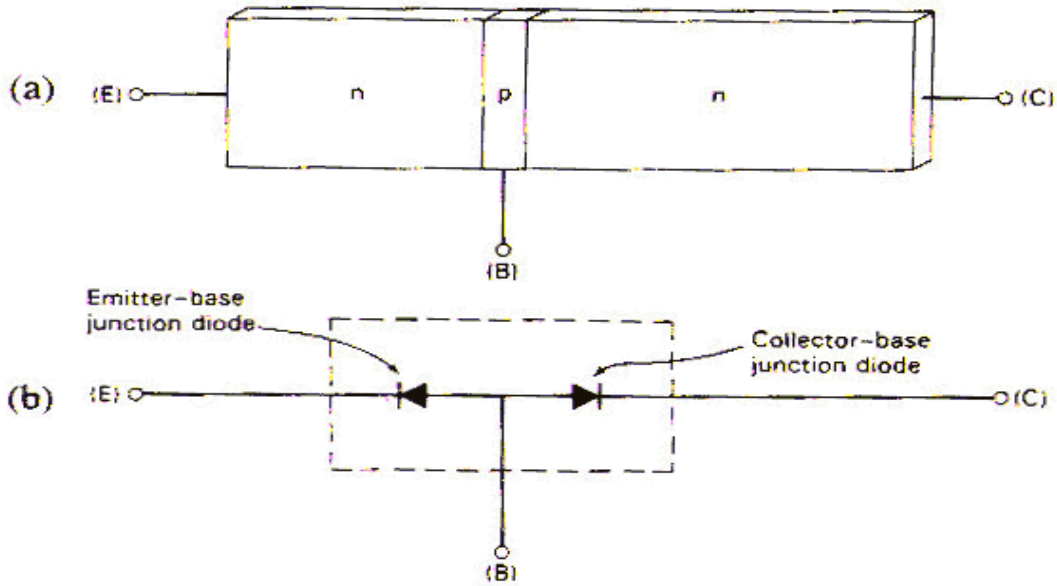
VC, VB และ VE เป็นแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากขั้ว C, B และ E

VCE , VBE และVCB เป็นแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ระหว่างขั้วที่ระบุตามตัวห้อย

โครงสร้างและการทำงานของทรานซิสเตอร์

(Transistor Construction and Operation)

ได้กล่าวมาแล้วว่าทรานซิสเตอร์ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำ 3 ชิ้นต่อเชื่อมกัน ดังนั้นจึงมีรอยต่อ pn จำนวน 2 ตำแหน่งดังรูป



ตำแหน่งที่อิมิตเตอร์กับเบสเชื่อมกันเป็นรอยต่อ pn เรียกว่า **รอยต่ออิมิเตอร์-เบส (Emitter Base Juntion)** ส่วนตำแหน่งที่ คอลเลคเตอร์กับเบสต่อเชื่อมกันเรียกว่า รอยต่อ**คอลเลคเตอร์-เบส (Collector Base Juntion)** เขียนแทนได้ด้วย ค่าเทียบเคียงของไดโอด เมื่อนำหลักการ มาร่วมพิจารณา ทำให้ทราบว่าการที่จะนำทรานซิลเตอร์ไปใช้งานได้นั้นต้องต่อแรงดัน ไฟฟ้าเพื่อทำการไบอัสที่รอยต่อหรือไดโอดเทียบเคียงทั้งสอง เนื่องจากทรานซิลเตอร์ มี 3 ขั้ว การต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเพื่อให้ทราน ซิสเตอร์ทำงานจึงเป็นไปได้ 3 แบบคือ

การให้ทรานซิสเตอร์ทำงานที่บริเวณคัตออฟ (Cut-off Region)

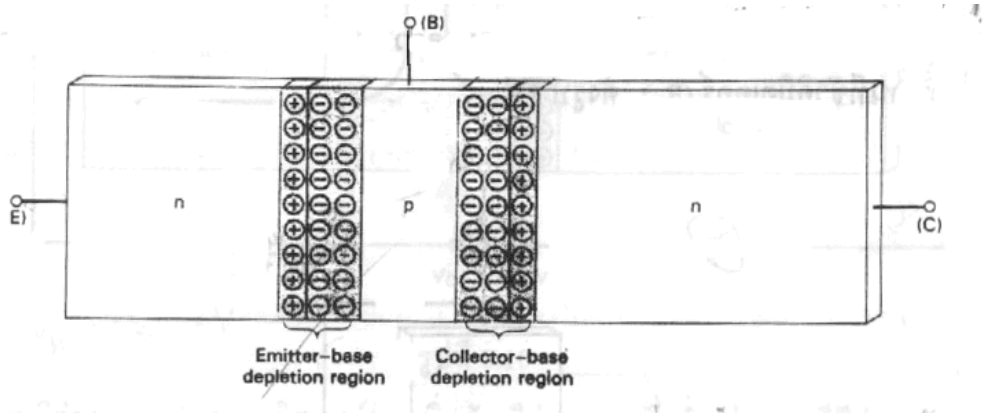
การให้ทรานซิสเตอร์ทำงานที่บริเวณอิ่มตัว (Saturation Region)

การให้ทรานซิสเตอร์ทำงานที่บริเวณแอกตีฟ (Active Region)

ในการอธิบายถึงการทำงานที่บริเวณต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์นั้น จะเริ่มต้นจากกรณีไม่มีการต่อแรงดันที่ขั้ว ของทรานซิสเตอร์ หรือกรณีไม่ได้รับการไบอัส

กรณีไม่ได้รับการไบอัส

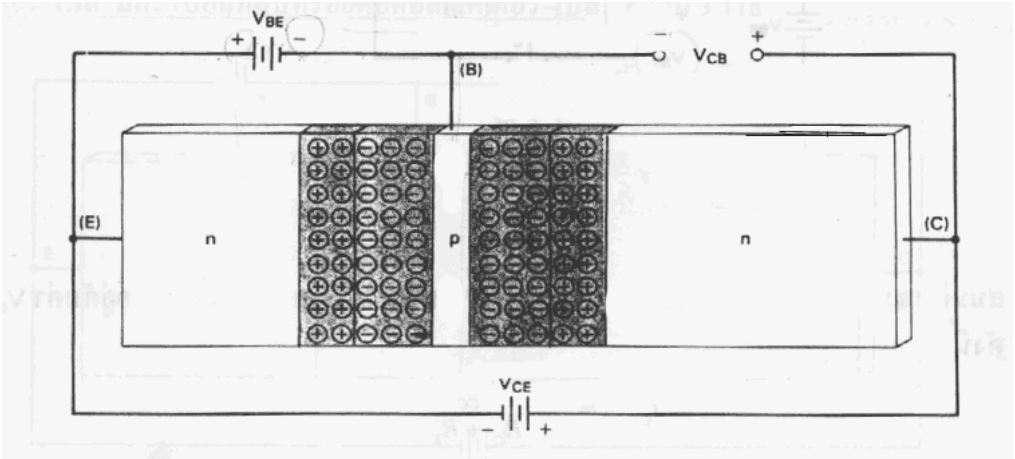
ขณะทรานซิสเตอร์ไม่ได้รับการไบอัส จะเกิดบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) ที่รอยต่อทั้งสอง



การทำงานที่บริเวณคัตออฟ

การต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในบริเวณคัตออฟเป็นการไบอัสกลับ ที่รอยต่อทั้ง 2 ตำแหน่ง ซึ่งจะทำให้กระแสที่ไหลผ่านขั้วทั้งสามมีค่าใกล้ศูนย์

จากการต่อวงจรในลักษณะดังกล่าวบริเวณปลอดพาหะทั้งสองบริเวณจะขยายกว้างขึ้น จึงมีเพียงกระแสย้อน กลับ (Reverse Current) กระแสรั่วไหลปริมาณต่ำมากเท่านั้นที่ไหลจากคอลเลคเตอร์ไปยังอิมิตเตอร์ได้

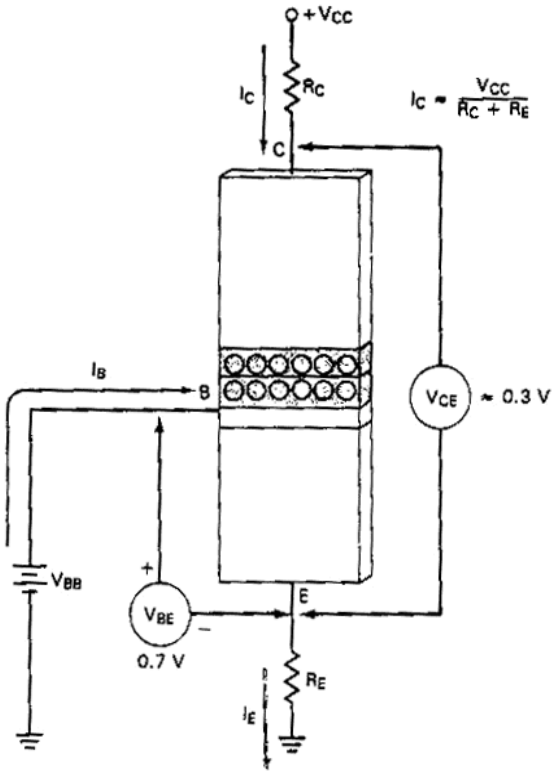


การทำงานที่บริเวณอิ่มตัว

จาก**สมการ ที่1** ทำให้ทราบว่าถ้าค่า IB เพิ่มขึ้น IC ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อ IC เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด หรือ

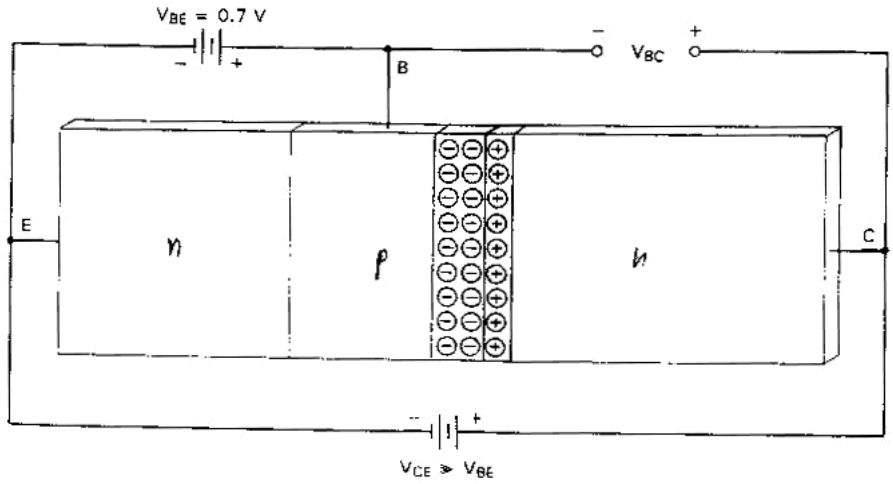
เรียกว่า ทรานซิสเตอร์เกิดการอิ่มตัว ณ ตำแหน่งนี้ค่า IC จะเพิ่มตามค่า IB ไม่ได้อีกแล้ว

การหาค่า IC ทำได้โดยใช้ VCC หารด้วยผลรวมของความต้านทานที่ขั้วคอลเลคเตอร์ (RC) กับความต้านทาน ที่ขั้วอิมิตเตอร์(RE) ดังรูป



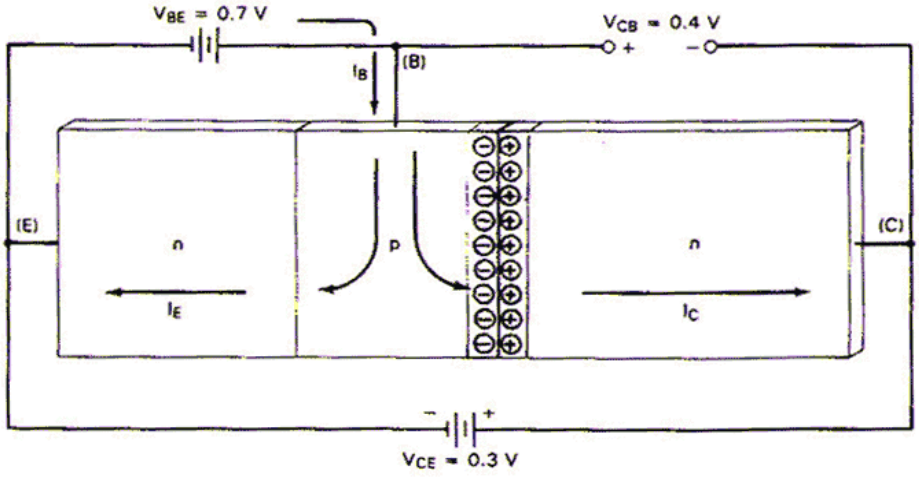
สมมติขณะที่ VCE ของทรานซิสเตอร์มีค่า 0 V (สภาพในอุดมคติ) IC จะขึ้นอยู่กับค่า VCC, RC และ RE ดังนี้ IC = VCC / (RC+RE)

การต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในบริเวณอิ่มตัว เป็นการไบอัสตรงที่รอยต่อทั้ง 2 ตำแหน่ง ของทรานซิสเตอร์ ดังรูป



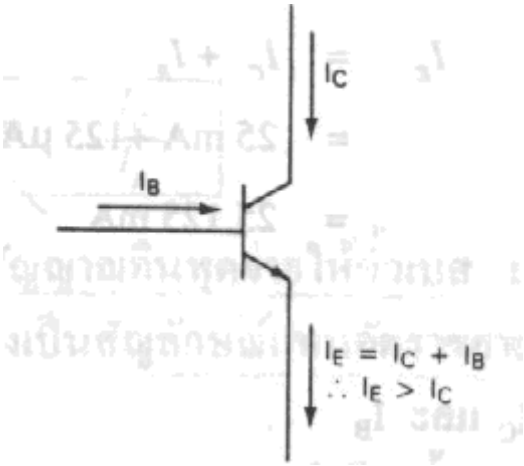
สมมติค่า VCE ของทรานซิสเตอร์ขณะอิ่มตัว มีค่า 0.3 V (ซึ่งต่ำกว่า VBE ที่มีค่า0.7 V) บริเวณรอยต่อคอลเลคเตอร์-เบส จะได้รับการไบอัสตรงด้วยผลต่างระหว่างแรงดัน VBE กับ VCE (เท่ากับ 0.4 V) กระแสไฟฟ้า IE, IC และ IB จะมีทิศทาง

ดังรูป



การทำงานที่บริเวณแอกตีฟ

การต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในบริเวณแอกตีฟเป็นการแอกตีฟเป็น การไบอัสตรงที่รอยต่อ อิมิตเตอร์-เบส และไบอัสกลับที่รอยต่อคอลเลคเตอร์-เบส ดังรูป



การอธิบายหลักการทำงานของทรานซิสเตอร์ในบริเวณนี้จะง่ายขึ้น ถ้าพิจารณาเฉพาะรอยต่ออิมิตเตอร์-เบส โดยแทนด้วยสัญลักษณ์ของไดโอด ดังรูป b [สมมติ VBE มีค่ามากพอที่จะทำให้ไดโอดทำงาน (Si ประมาณ 0.7 V และGe ประมาณ 0.3 V)]

รอยต่อคอลเลคเตอร์-เบสได้รับการไบอัสกลับ ทำให้บริเวณปลอดพาหะกว้างกว่าที่รอยต่ออิมิตเตอร์-เบสซึ่ง ได้รับการไบอัสตรง ดังนั้น ความต้านทานที่เบส (RB) จึงมีค่าสูง เมื่อพิจารณาในรูปของไดโอดจะเห็นว่า IB เป็นกระแสที่มีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับกระแสคอลเลคเตอร์ (IC) และเป็นส่วนหนึ่งของ IE ดังนั้น IE ส่วนใหญ่จึงเป็นกระแส IC ซึ่งผ่านรอยต่อคอลเลคเตอร์- เบส ของทรานซิสเตอร์

ค่าพิกัดของทรานซิสเตอร์

ค่าพิกัดของทรานซิสเตอร์มีหลายประเภท ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงค่าพิกัดเฉพาะบางประเภทอันเป็นพื้นฐาน สำคัญสำหรับการนำทรานซิสเตอร์ไปใช้วานให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด และหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดความเสียหายใด ๆ ซึ่งได้แก่ พิกัดเบตา
ไฟฟ้ากระแสตรง, พิกัดอัลฟาไฟฟ้ากระแสตรง, พิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุด และพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุด

เบตาไฟฟ้ากระแสตรง (DC BETA)

พิกัดเบตาไฟฟ้ากระแสตรงของทรานซิสเตอร์ซึ่งมักเรียกสั้น ๆ ว่าเบตา เป็นอัตราส่วนของ IC ต่อ IB เขียน เป็นสมการได้ดังนี้ คือ

Beta = IC / IB **สมการที่ 3**

วงจรทรานซิสเตอร์ส่วนมากมีสัญญาณอินพุตจ่ายให้ขั้วเบส และสัญญาณเอาต์พุตออกจากขั้วคอลเลคเตอร์ เบตาของทรานซิสเตอร์จึงเป็นสัญลักษณ์แทนอัตราขยายกระแส dc (dc Current Gain) ของทรานซิลเตอร์

จากสมการ 1 และ 3 หาค่ากระแสอิมิตเตอร์ได้ ดังนี้

IC = Beta * IB **สมการที่ 4**

IE = IB + IC

= IB+ Beta*

IE = IB (1+Beta) **สมการที่ 5**

เราใช้เบตาและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วใดขั้วหนึ่งหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ขั้วอื่น ๆ ได้

อัลฟาไฟฟ้ากระแสตรง (DC Alpha)

พิกัดอัลฟาของทรานซิสเตอร์ ซึ่งมักเรียกสั้น ๆ ว่า อัลฟา คือ อัตราส่วน IC ต่อ IE เขียนเป็น สมการได้ ดังนี้

Alpha = IC / IE **สมการที่ 6**

เมื่อนำกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์มาร่วมพิจารณา จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ ขั้วทั้งสามของทรานซิสเตอร์เป็นดังสมการ 1 คือ

IE = IB+IC

IC = IE-IB

เนื่องจาก IC มีค่าต่ำกว่า IE (เป็นปริมาณเท่ากับ IBดังนั้น Alpha หรือ IC/IE จึงมีค่าต่ำกว่า I จากสมการที่ 6 ทำให้ได้

IC = Alpha * IE **สมการที่ 7**

จากความสัมพันธ์ดังกล่าว หาค่า IB ได้ดังนี้

IB = IE- IC

= IE- (Alpha* IE)

IB = IE(1-Alpha) **สมการที่ 8**

ความสัมพันธ์ระหว่างอัลฟาและเบตา (The Relationship Between Alpha and Beta)

โดยทั่วไปสเปคของทรานซิสเตอร์จะระบุค่าเบตา แต่จะไม่มีค่าอัลฟาเนื่องจากมักใช้ค่าเบตาสำหรับการคำนวณในวงจรทรานซิสเตอร์มากกว่าอัลฟาแต่ในบางครั้งจำเป็นต้องหาค่าอัลฟาเพื่อคำนวณค่าอื่นต่อไป จึงมีวิธีการหาค่าอัลฟาในเทอมของเบตา โดยเริ่มต้นจาก Alpha = IC / IE

เขียนสมการใหม่โดยใช้สมการ ที่4 แทนค่า IC และสมการ ที่5 แทนค่า IE

Alpha = Beta / (1+ Beta) **สมการที่ 9**

IE = (Beta + 1)*IB **สมการที่ 10**

พิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุด

สเปคของทรานซิสเตอร์ระบุค่าพิกัดสูงสุดของกระแสคอลเลคเตอร์ [IC(max)] ไว้เสมอ

IC (max) หมายถึง กระแสคอลเลคเตอร์สูงสุดที่ทรานซิสเตอร์ทนได้โดยไม่ทำให้เกิดความร้อนจน ทรานซิสเตอร์ เสียหาย ดังนั้นการนำทรานซิสเตอร์ไปใช้งานต้องระวังไม่ให้ค่า IC สูงกว่า

IC(max) ค่า IC(max) จะขึ้นอยู่กับค่ากระแสเบสสูงสุด[IB(max)] ดังนี้

IB(max) = IC(max) / Beta (max) **สมการที่ 11**

พิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุด

สเปคของทรานซิสเตอร์ส่วนมากจะระบุค่าพิกัดสูงสุดของแรงดันที่ขั้วคอลเล คเตอร์-เบส [VCB (max)] VCB(max) หมายถึง แรงดันไบอัสกลับที่ใช้กลับที่ใช้กับรอยต่อคอลเลคเตอร์-เบสได้ โดยไม่ทำให้ ทรานซิสเตอร์เสียหาย ดังนั้นการนำทรานซิลเตอร์ไปใช้งานจึงต้องระวังไม่ให้ VCB สูงกว่า VCB(max)

การจัดโครงสร้างของทรานซิสเตอร์พื้นฐาน (Basic Transistor Configuration)

เราทราบว่าโครงสร้างของทรานซิสเตอร์มีจำนวนทั้งหมด 3 ขั้ว จึงจัดโครงสร้างให้อยู่ในรูปวงจรได้ 3 แบบ คือ

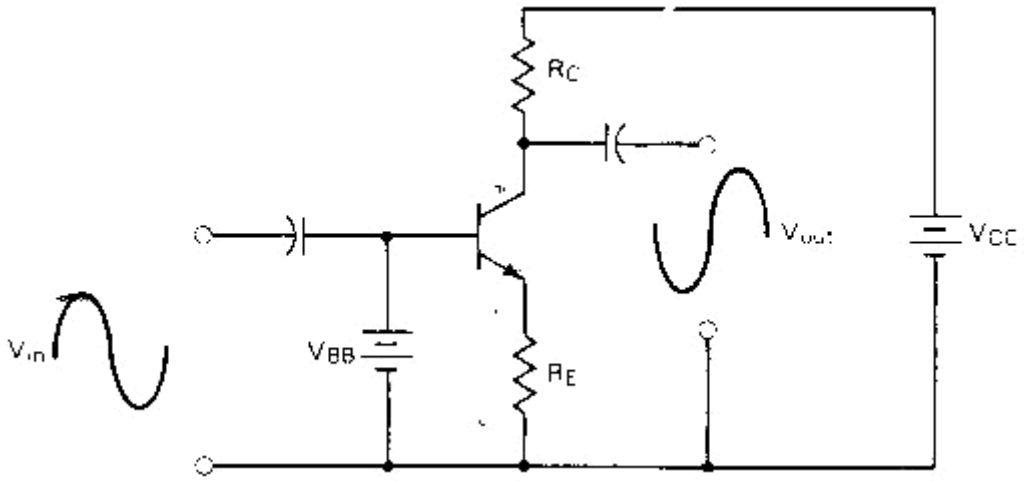
*วงจรอิมิตเตอร์ร่วม

*วงจรคอลเลคเตอร์ร่วม

*วงจรเบสร่วม

***วงจรอิมิตเตอร์ร่วม (Common Emitter)**

วงจรอิมิตเตอร์ร่วม เป็นวงจรที่มีการจ่ายอินพุตให้กับขั้วเบสและมีเอาต์พุตออกมาจากขั้วคอลเลคเตอร์

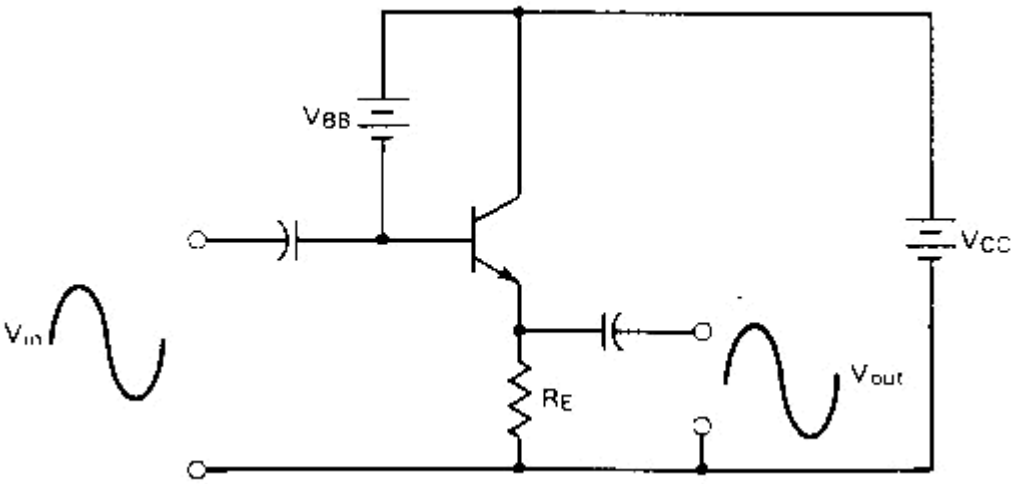


ชื่ออิมิตเตอร์ร่วมเป็นนัยแสดงว่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทั้งสองมีจุดต่อร่วม กับขั้วอิมิตเตอร์ วงจรอิมิตเตอร์ร่วมมีอัตราขยายกระแสและอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าสูงและมีการ เลื่อนเฟส แรงดัน ac อินพุตไปยังเอาต์พุต เป็นมุม 180 องศา

วงจรคอลเลคเตอร์ร่วมหรือวงจรตามสัญญาณอิมิตเตอร์

(Common Collector or Emitter Follower)

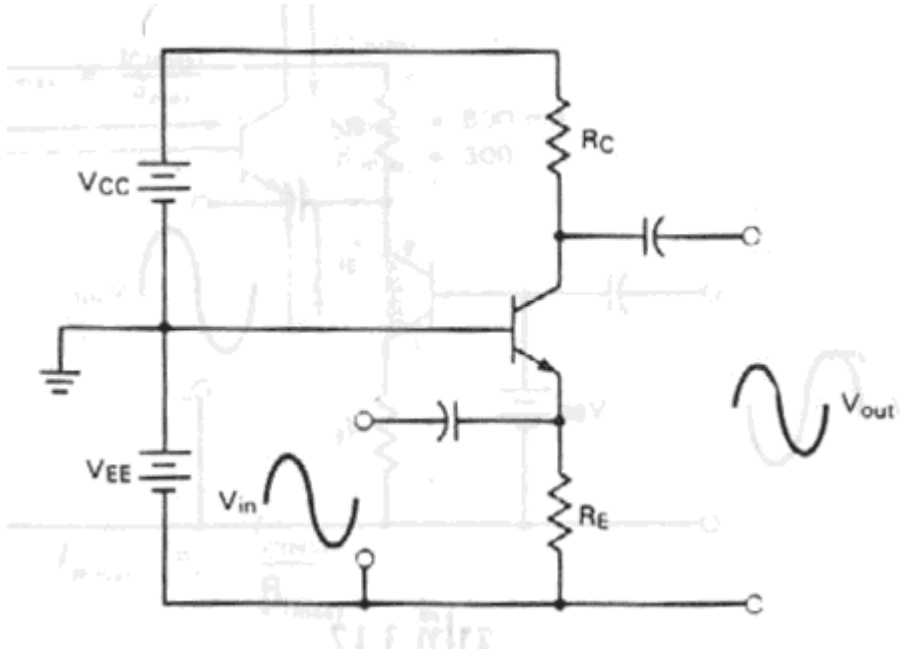
วงจรคอลเลคเตอร์ร่วมหรือวงจรตามสัญญาณอิมิตเตอร์เป็นวงจรที่มีการจ่ายอินพุต ให้ ขั้วเบสและเอาต์พุตออกจากขั้วอิมิตเตอร์



วงจรคอลเลคเตอร์ร่วมมีอัตราขยายกระแสไฟฟ้าสูง แต่อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าต่ำ แรงดัน ac อินพุตกับแรงดัน ac เอาต์พุตจะ inphase กัน

วงจรเบสร่วม (Common Base)

วงจรเบสร่วม เป็นวงจรที่มีการจ่ายอินพุตให้ขั้วอิมิตเตอร์ และเอาต์พุตออกจากขั้วคอลเลคเตอร์ ชื่อเบสร่วมเป็นนัยแสดง ให้ทราบว่าขั้วเบสเป็นจุดต่อร่วมกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทั้งสอง วงจรเบสร่วม ใช้มากในงานที่ต้องการความถี่สูง มีอัตราขยายกระแสไฟฟ้าต่ำ อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า สูง และแรงดัน ac อินพุตกับแรงดัน ac เอาต์พุต Inphase กัน



เคอร์ฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ (Transistor Characteristic Curves)

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาเคอร์ฟคุณลักษณะที่ใช้อธิบายการทำงานของทรานซิลเตอร์ ซึ่งประกอบ ด้วยเคอร์ฟคอลเลคเตอร์เคอร์ฟเบส (ไม่พิจารณาเคอร์ฟของอิมิตเตอร์ เนื่องจากมีคุณลักษณะเหมือนกัลคอลเลคเตอร์) และเคอร์ฟาเบตา

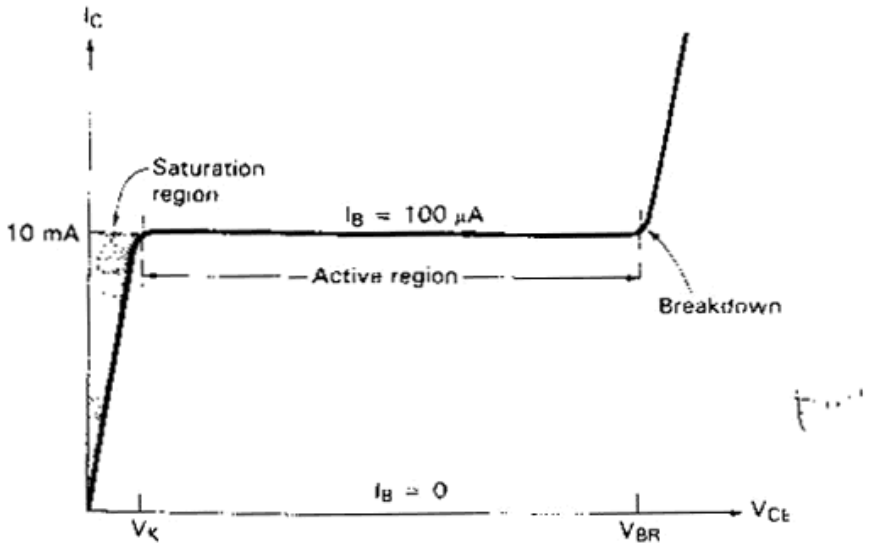
เคอร์ฟคอลเลคเตอร์ (Collector Curves)

เคอร์ฟคอลเลคเตอร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง IC IB และ VCE ดังรูป สังเกตได้ว่าเคอร์ฟแบ่ง ออกเป็น 3 ส่วน คือ

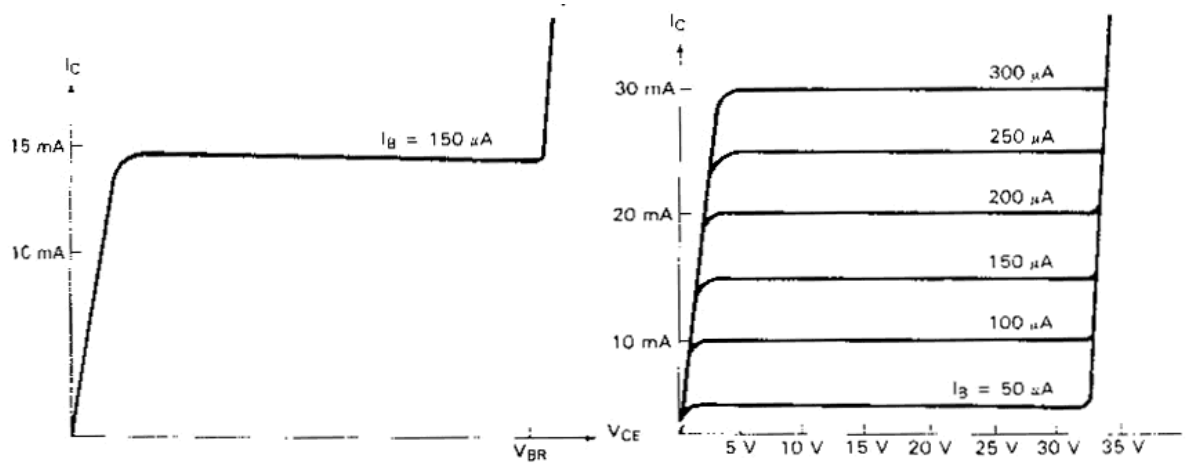
- บริเวณอิ่มตัว (Saturation Region) คือบริเวณที่มีค่า VCE ต่ำกว่าแรงดันที่ส่วนโค้งของเคอร์ฟ (Knee Voltage; VK) ซึ่งเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้ทรานซิสเตอร์เริ่มทำงาน

บริเวณแอกตีฟ (Active Region) คือบริเวณที่มีค่า VCE อยู่ระหว่าง VK ถึงแรงดันพังทลายหรือแรงดันเบรกดาวน์ (Breakdown Voltage; VBR)

บริเวณเบรกดาวน์ (Breakdown Region) คือบริเวณที่มีค่า VCE มากกว่า VBR ขึ้นไป

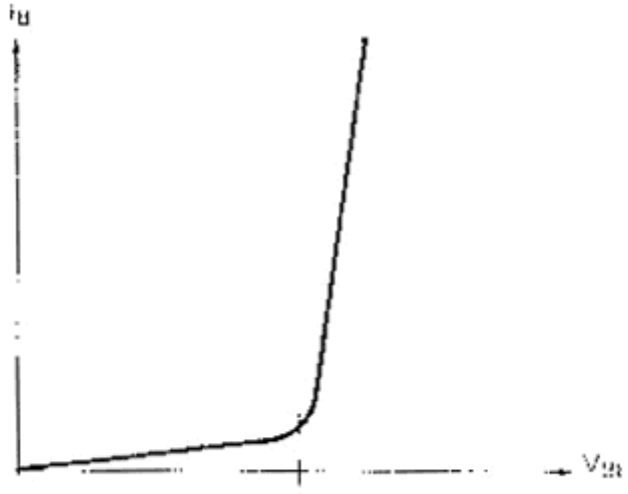


ถ้าเราเพิ่มค่า IB จาก 100 uA เป็น 150 uA ก็จะได้เคอร์ฟเป็นดังรูป และหากเปลี่ยแปลง IB หลาย ๆ ค่าก็จะได้เคอร์ฟคอลเลคเตอร์ ดังรูป



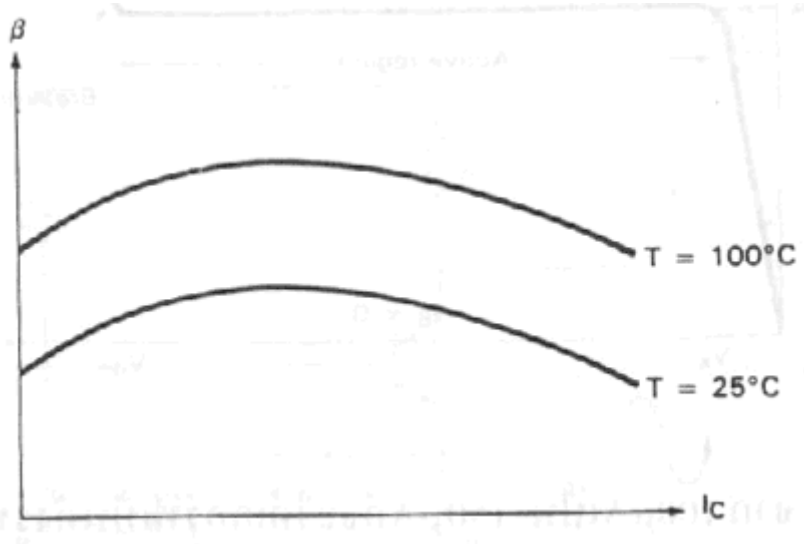
เคอร์ฟเบส (Base Curves)

เคอร์ฟเบสของทรานซิสเตอร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง IB กับ VBE ดังรูป จะเห็นได้ว่าเคอร์ฟนี้ มีลักษณะคล้ายกัลเคอร์ฟของไดโอดขณะได้รับไบอัสตรง



เคอร์ฟเบตา (Beta Curves)

เคอร์ฟเบตาแสดงลักษณะที่เบตาไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและIC ดังรูป



จะเห็นได้ว่าขณะอุณหภูมิ(T) = 100 C ∴ เบตาจะมีค่ามากกว่าขณะอุณหภูมิ(T)= 25 C ∴ นอกจากนี้แบตายังลดลงเมื่อ IC เปลี่ยนแปลงต่ำกว่าและสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้อีกด้วย

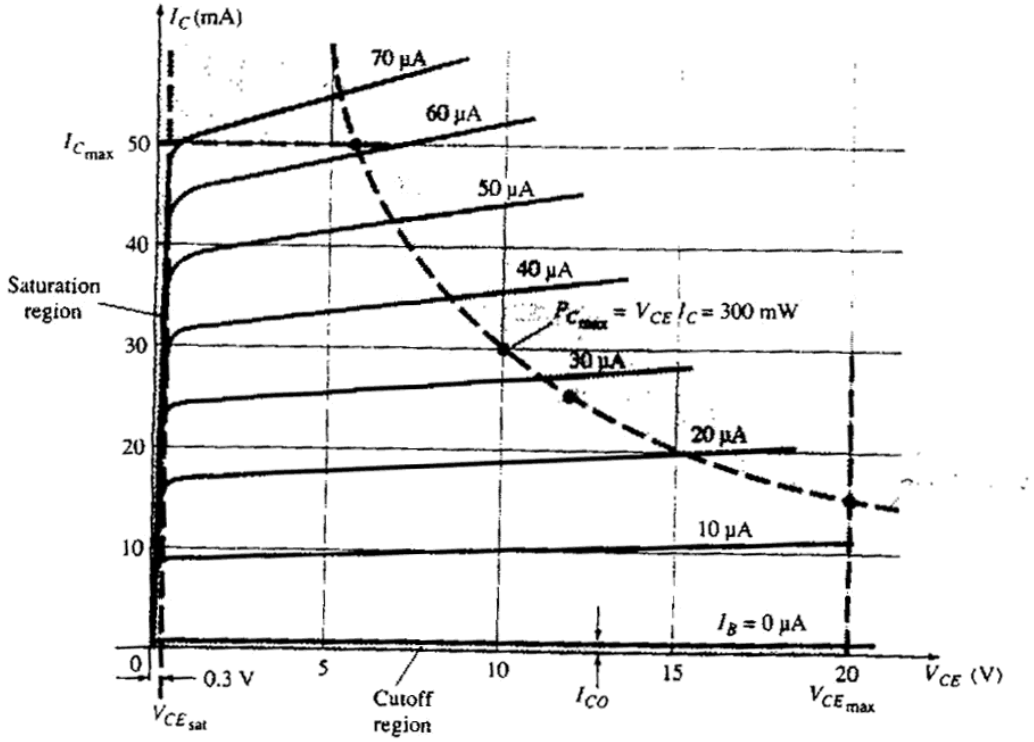
ข้อจำกัดในการทำงาน (Limits of Operation)

เราทราบว่าเคอร์ฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ประกอบด้วย 3 บริเวณ(ไม่รวมบริเวณเบรกดาวน์) คือบริเวณแอกตีฟ, คัตออฟ และอิ่มตัว ถ้าต้องการได้สัญญาณเอาต์พุตที่ดีที่สุด ไม่เพี้ยนหรือบิดเบี้ยว ต้องกำหนดบริเวณการทำงาน ให้อยู่ **ในย่านแอกตีฟเท่านั้น**

จากหัวข้อที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่าการนำทรานซิสเตอร์ไปใช้งานโดยไม่เกิดความเสียหายนั้น จะต้องมีค่า IC ต่ำกว่า IC(max) และค่า VCB ต่ำกว่าVCB(max)นอกจากนั้นค่า VCE ที่ใช้งานต้องต่ำกว่า VCE(max) ด้วย

เคอร์ ฟคอลเลคเตอร์ เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่าง IC กับ VCE เส้นแนว ตั้งของเคอร์ฟที่ตำแหน่ง VCE(sat) และ VCE(max) เป็นส่วนหนึ่งที่กำหนดขอบเขต การทำงานของทรานซิสเตอร์ในบริเวณแอกตีฟ ตำแหน่ง VCE(sat) เป็นตัวกำหนดค่า VCE ต่ำสุดที่ใช้งานได้ คือบอกให้ทราบว่าการทำงาน ของทรานซิสเตอร์ตั้งแต่ค่านี้เป็นต้นไปไม่อยู่ในบริเวณอิ่มตัว

ส่วนตำแหน่ง VCE(max) เป็นตัวกำหนดค่า VCE สูงสุดที่ใช้งานได้ คือบอกให้ทราบว่าการทำงานของทรานซิสเตอร์ไม่อยู่ในบริเวณเบรกดาวน์



ตัวบ่งบอกขอบเขตการใช้งานของทรานซิสเตอร์นอกเหนือจาก VCE(sat)และ VCE(max) คือ กำลังสูญเสียสูงสุด PC(max) ซึ่งหาค่าได้จาก

PC(max) = VCE(max)* ICE(max)

สำหรับคุณลักษณะของทรานซิลเตอร์ในรูป

PC(max) = (20V)(50mA) = 300mW

เมื่อทราบค่า PC (max) ก็จะสามารถเขียนเคอร์ฟกำลังสูญเสียสูงสุดที่มีความสัมพันธ์กับเส้นแนวตั้งของเคอร์ฟที่ตำแหน่ง VCE(sat)และ VCE(max) ได้โดยเลือกค่า VCE และ IC ที่เหมาะสมแล้วแทนลงในสมการ

PC(max) = VCE IC **สมการที่ 12**

สำหรับกรณีนี้

PCman = VCEIC = 300mW

เลือกค่า IC(max) = 50 mA และแทนค่าลงในสมการข้างต้น

VCEIC = 300 mW

VCE(50 mA) = 300 mW

VCE = 6V

เลือกค่า VCE(max) = 20V แทนค่าลงในสมการเดิม

(20V)IC = 300mW

IC = 15mA

เลือกค่า IC = 25 mA

VCE(25mA) = 300mW

VCE = 12V

จากค่าที่ได้นำมาเขียนเคอร์ฟ PC(max)เป็นเส้นโค้งประ สำหรับบริเวณคัตออฟคือบริเวณที่ IC มีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหล(ICO) เป็นบริเวณที่ไม่เหมาะสม กับการใช้งาน เพราะจะทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตที่เพี้ยนหรือบิดเบี้ยว ส่วนบริเวณที่อยู่ภายในกรอบเส้นประ เรียกว่า บริเวณแอกตีฟ ถ้าต้องการให้ทรานซิสเตอร์ ทำงานในบริเวณดังกล่าวต้องมี

ICO <= IC <= IC(max)

VCE(Sat) <= VCE <= VCE(max)

VCEIC <= PC(max) **สมการที่ 13**

ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์ (Field Effect Transister)

ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์ หรือ เฟท เป็นทรานซิสเตอร์ชนิดพิเศษที่ทำงานแบบยูนิโพลาร์ (Uni-polar) ซึ่งต่างจากทรานซิสเตอร์ธรรมดาที่เป็นอุปกรณ์ไบโพลาร์ (Bi-polar) กระแสที่เกิดขึ้นของทรานซิสเตอร์ธรรมดาได้มาจากการทำงานโดยการแลกเปลี่ยนระ หว่างโฮลกับอิเล็กตรอน ส่วนเฟททำงานโดยให้กระแสไหลทางเดียวเท่านั้นเอง เราจึงเรียกว่าเฟทเป็นอุปกรณ์ยูนิโพลาร์

ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์เป็นที่นิยมแพร่หลายกันในปัจจุบันเนื่องจากว่าเฟทมีคุณสมบัติคล้ายกับหลอดสุญญากาศ คือ ทำงานโดยจะใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าทางอินพุทไปควบคุมกระแสทางด้านเอาท์พุท ผิดกับทรานซิสเตอร์ธรรมดาที่ใช้กระแสควบคุมกระแส ดังนั้นทรานซิสเตอร์จึงมีอินพุทอิมพีแดนซ์อยู่ในระดับกลางเท่านั้น ในขณะที่เฟทมีอินพุทอิมพีแดนซ์สูงมากทำให้มีข้อดีต่อวงจรขยายเสียงเป็นอย่าง มาก วงจรขยายเสียงในปัจจุบันถ้าต้องการคุณภาพจึงหันมาเลือกใช้เฟท (FET)

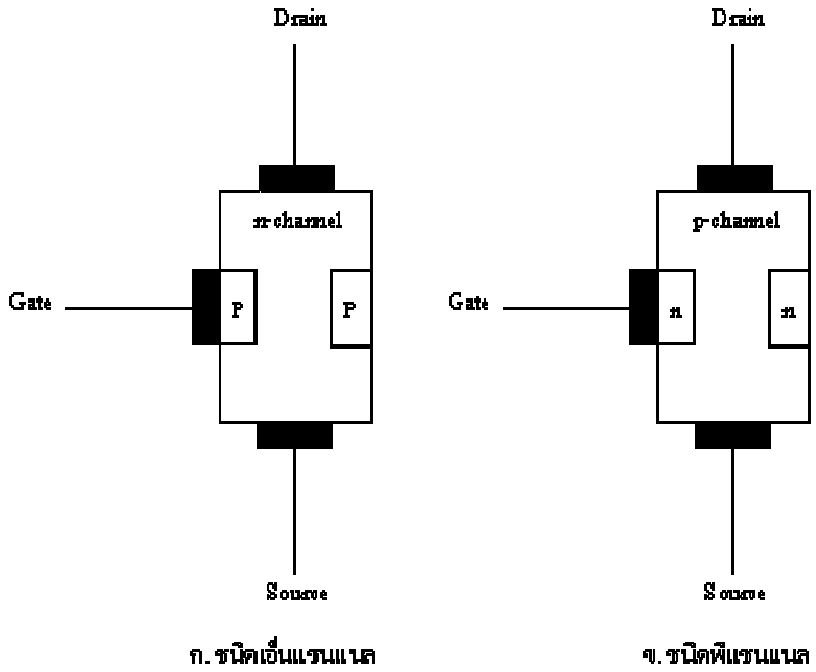
การทำงานของ ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์หรือเฟท อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า (Field) โดยใช้แรงเคลื่อนสนามไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยเป็นตัวควบคุม สิ่งนี้เองที่ทำให้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดนี้ถูกเรียกว่า “ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์”

ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์หรือเฟท สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ1. เจเฟท (J-FET) เป็นทรานซิสเตอร์ที่ประกอบมาจากหัวต่อ P-N การทำงาน ของเฟทชนิดนี้จะใช้หลักการพองตัวของสนามไฟฟ้าในรูปของดีพลีชั่นตรงช่วงรอย ต่อ พี-เอ็น

2. มอสเฟท (MOS-FET) เป็นเฟทที่มีโครงสร้างแตกต่างไปจากเจเฟท เพราะที่ขาเกตจะมีฉนวนกั้น การทำงานจะใช้การเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าแทนที่จะใช้การพองตัวของดีพลีชั่นโดย ตรง

1. โครงสร้างทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดรอยต่อเจเฟต

เจเฟต (Junction Field Effect Transistor) เมื่อพิจารณาคามโครงสร้างดังรูปที่ 1 จะพบว่าเจเฟตมี 2 ชนิด คือ เจเฟตชนิดเอ็นแชนแนล ดังรูปที่1 ก. และชนิด พีแชนแนล ดังรูปที่ 1 ข. เจเฟตนั้นมีขาต่อใช้งาน 3 ขา คือ ขาเดรน (D) ขาเกต (G) และขาซอร์ส (S) เจเฟตชนิดเอ็นแชนแนลชิ้นสารชนิดเอ็นจะเป็นขาเดรนและขาซอร์ส สำหรับขาเกตจะเป็นชิ้นสารชนิดพี ดังรูปที่1 ก. ส่วนเจเฟตชนิดพีแชนแนลนั้น ขาเดรนและขาซอร์สจะเป็นชิ้นสารชนิดพี สำหรับขาเกตจะเป็นชิ้นสารชนิดเอ็น ดังรูปที่1 ข.

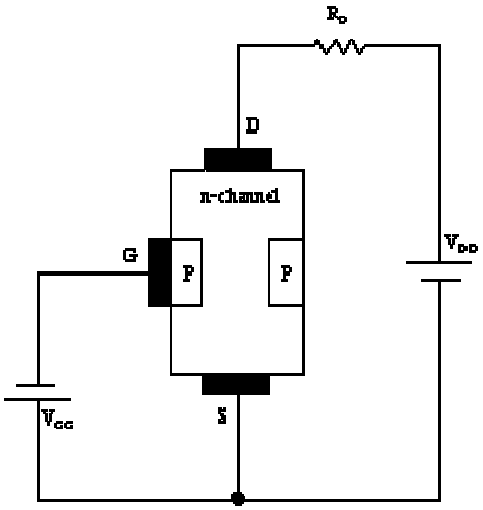


รูป ที่ 1 แสดงโครงสร้างเจเฟตชนิดเอ็นแชนแนลและชนิดพีแชนแนล

2. การจัดไบอัสให้เจเฟต

เมื่อป้อนแรงดันไบอัสที่ขาเดรนและขาซอร์สโดยแหล่งจ่าย V_{DD} ให้ขั้วบวกกับขาเดรน (D) และขั้วลบกับขาซอร์ส (S) ส่วนขาเกต (G) กับขาซอร์ส (S) จะให้ไบอัสกลับซึ่งเจเฟตชนิด

เอ็นแชนแนล ขาเกตเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type) ดังนั้นแรงดันไบอัสที่ขาเกต V_{GG} ต้องให้ไฟลบกับขาเกตและไฟบวกกับขาซอร์สดังรูปที่ 2



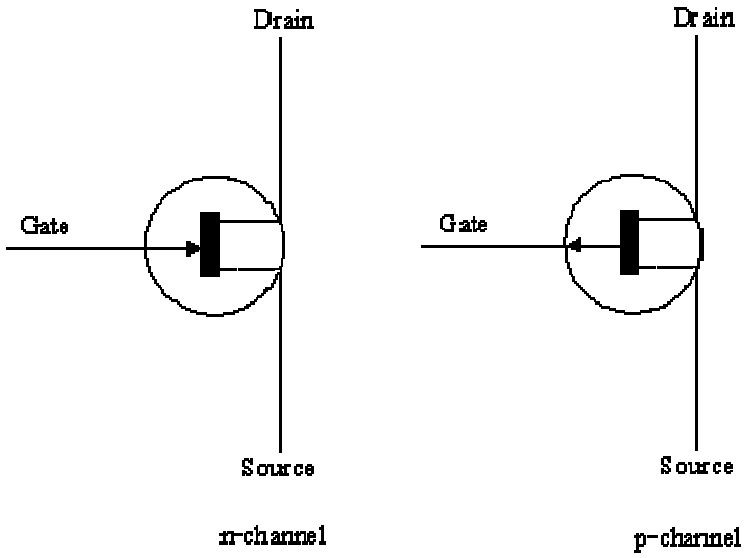
รูปที่ 2 แสดงการไบอัสเจเฟตชนิดเอ็นแชนแนล

เมื่อให้ไบอัสกลับที่ขาเกตเมื่อเทียบกับขาซอร์ส (V_{GS}) จะเกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อพี – เอ็น ทั้งสองด้านขึ้นทำให้ช่องทางเดินของกระแสในสารเอ็น (เนื้อสารส่วนใหญ่) ระหว่างขาเดรนกับขาซอร์สแคบลง กระแสเดรน (I_D) จะไหลจากขาเดรนไปสู่ขาซอร์สได้จำนวนหนึ่ง

ถ้าปรับค่าแรงดันระหว่างขาเกตกับขาซอร์ส (V_{GS}) ให้มีค่าไบอัสกลับน้อยลงจะทำให้ช่องทางเดินของกระแสระหว่างขาเดรนกับขาซอร์ สมีขนาดกว้างขึ้น ทำให้กระแสเดรนไหลได้สะดวกและมากขึ้น จากสภาวะดังกล่าวทำให้สามารถควบคุมปริมาณกระแสเดรน (I_D) จะไหลผ่านเจเฟตได้ โดยการควบคุมแรงดันไบอัสกลับที่ขาเกตกับขาซอร์สของเจเฟต

3. สัญลักษณ์ของเจเฟต

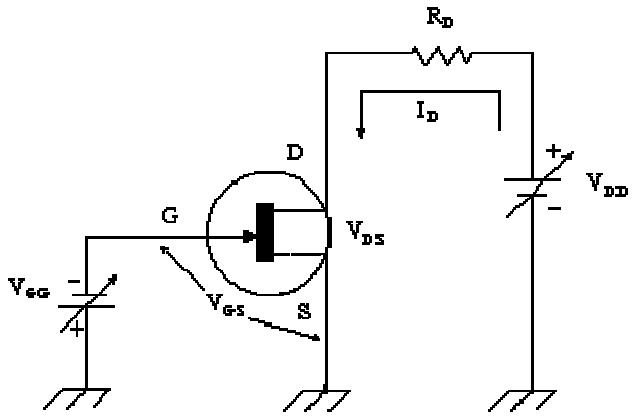
สัญลักษณ์ของเจเฟตชนิดเอ็นแชนแนลนั้น หัวลูกศรที่ขาเกตจะชี้เข้า แต่ชนิดพีแชนแนล หัวลูกศรที่ขาเกตจะชี้ออก แสดงในรูปที่ 3

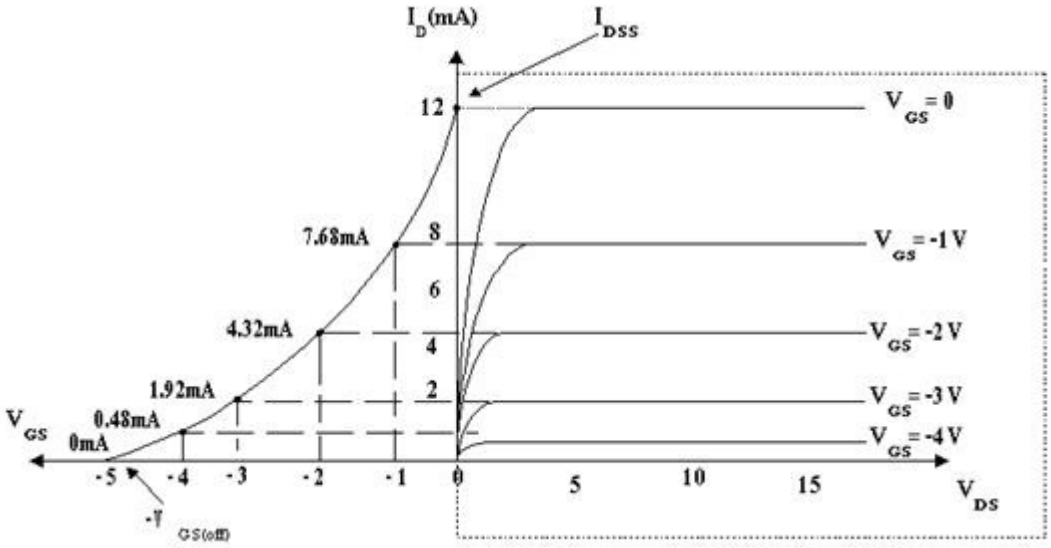


รูปที่ 3 แสดงสัญลักษณ์ของเจเฟตชนิด N-Channel และ P-Channel

4. ลักษณะสมบัติ ของเจเฟต

ลักษณะสมบัติของเจเฟตให้พิจารณาในรูปที่ 4 เมื่อเจเฟตเป็น N-Channel โดยให้ขา D มีศักย์สูงกว่าขา S และสำหรับเจเฟตชนิด P-Channel ให้ ขา D มีศักย์ต่ำกว่าขา S เมื่อขา G-S ให้ไบอัสกลับทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่ช่อง (Channel) เป็นผลให้ความนำไฟฟ้าระหว่างขา D กับ S ลดลง กระแสเดรน I_D ก็มี ค่าลดลง ถ้าไบอัสกลับที่ขา G-S มากขึ้นจนกระทั่งกระแสเดรนเท่ากับศูนย์พอดีค่าแรงดันไบอัสกลับนี้เรียกว่า “Pinch Off Voltage” (V_P) หรือ $V_{GS(Off)}$ และถ้าให้แรงดันที่ขา G-S ของเจเฟต ให้มีค่า 0 โวลต์ ($V_{GS} = 0$ V) จะมีกระแสไหลผ่านเจเฟตคงที่ค่าหนึ่งเรียกว่ากระแส I_{DSS} ดังรูปที่ 4





รูป ที่ 4 กราฟลักษณะสมบัติการโอนย้ายและลักษณะสมบัติด้านเดรนของเจเฟตชนิด N-Channel

ในการห่าค่ากระแสเดรน I_D ย่านทำงานหรือย่านแอคทีฟ เมื่อแรงดันระหว่างเดรนกับซอร์ส V_{DS} คงที่ในแต่ละค่าที่พิจารณาหาได้จาก

$$I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2$$

I_{DSS} = กระแสอิ่มตัวระหว่างเดรนกับซอร์ส เมื่อ $V_{GS} = 0$

V_{GS} = แรงดันระหว่างเกตกับซอร์ส

V_P = แรงดันพินออฟหรือแรงดันระหว่างเกตกับซอร์ส ($V_{GS\,(Off)}$) ที่ทำให้ $I_D = 0$

ลักษณะสมบัติอีกอย่างหนึ่งเมื่อ V_{GS} คง ที่ เพิ่มค่าแรงดัน V_{DS} ขึ้นเรื่อยๆ ก็จะทำให้กระแสเดรนเพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะสมบัตินี้ เจเฟตจะเหมือนกับตัวต้านทานคงที่ตัวหนึ่ง การทำงานในย่านนี้เรียกว่า “ย่านโอห์มมิก” แต่ถ้าเพิ่มค่าแรงดัน V_{DS} ขึ้นเรื่อยๆ ถึงจุดๆ หนึ่ง กระแสเดรน (I_D) จะไม่เพิ่มอีกหรือมีค่าคงที่ นั่นคือเจเฟตทำงานอยู่ในย่านอิ่มตัวค่าแรงดัน V_{DS} นี้เรียกว่า $V_{DS\,(Sat)}$ สามารถหาได้จาก

$$V_{DS(Sat)} = V_{GS} - V_P$$

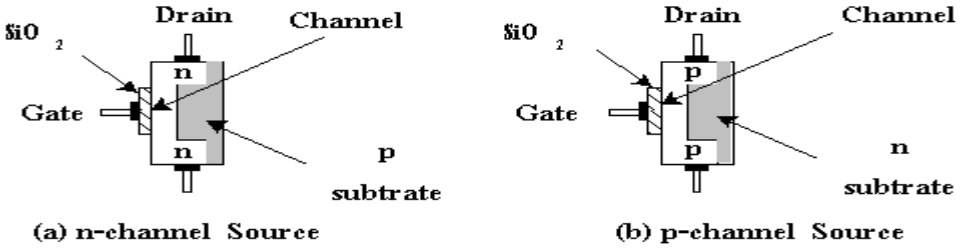
5. เฟตชนิดออกไซด์ของโลหะ (มอสเฟต)

มอสเฟตแตกต่างจากเจเฟตที่โครงสร้างภายในเจเฟตนั้น ระหว่างเกตกับช่องทางเดินกระแสมีโครงสร้างเป็นรอยต่อพี-เอ็นแต่มอสเฟตนั้นระ หว่างเกตกับช่องทางเดินกระแสมีโครงสร้างเป็นชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ มอสเฟตมี 2 ชนิดคือ มอสเฟตดีพลีชั่นและมอสเฟตเอ็นฮานซ์เมนต์

6.มอสเฟตชนิดดีพลีชั่น

โครงสร้างพื้นฐานของดีมอสเฟตแสดงดังรูปที่ 5 ถ้าเป็นชนิดเอ็นแชนแนลช่องทางเดินกระแสระหว่างเดรนและซอร์สจะเป็นสารกึ่งตัว นำชนิดเอ็นและมีวัสดุรองฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดตรงข้าม ดังรูปที่ 5 ก. สำหรับดีมอสเฟตชนิดพีแชนแนล จะมีช่องทางเดินกระแสระหว่างเดรนและซอร์สเป็นสารชนิดพีและมีวัสดุรองเป็นสาร ชนิดเอ็น ดังรูปที่ 5 ข. และมีเกตติดอยู่ระหว่างช่องทางเดินกระแสโดยมีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นฉนวนกั้น ระหว่างเกตกับช่องทางเดิน

กระแสเนื่องจากดีมอสเฟตทำงานได้ใน 2 ลักษณะคือ ดีพลีชั่นโหมดด้วยการควบคุมกระแสเดรนด้วยแรงดันเกตที่เป็นลบและเอ็น ฮานซ์เมนต์โหมด โดยการใช้แรงดันเกตที่เป็นบวกควบคุมการไหลของกระแสเดรน

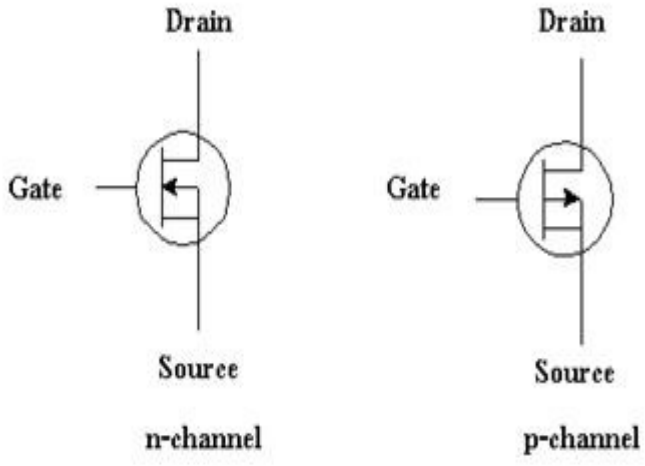


ก. ข.

รูป ที่ 5 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของดีมอสเฟต

7. เอนฮานซ์เมนต์โหมด

คือการไบอัสเกตของดีมอสเฟตด้วยแรงดันบวก ดังรูปที่ 6 ก. จะเห็นว่าเกตของดีมอสเฟตจะได้รับประจุบวกจากแหล่งจ่าย V_{GG} ทำให้ในแชนแนลของดีมอสเฟตเป็นประจุลบ ทำให้ช่องทางเดินกระแสระหว่างแดรนกับซอร์สไม่มีประจุชนิดตรงกันข้ามกับแช นแนลคอยบีบแชนแนลให้แคบลงทำให้กระแสเดรนไหลได้น้อยลง เพราะประจุลบในแขนแนลมีค่าลดลงเป็นศูนย์ สัญลักษณ์ของดีมอสเฟตทั้งชนิดเอ็นแชนแนลและชนิดพีแชนแนลดังรูปที่ 6

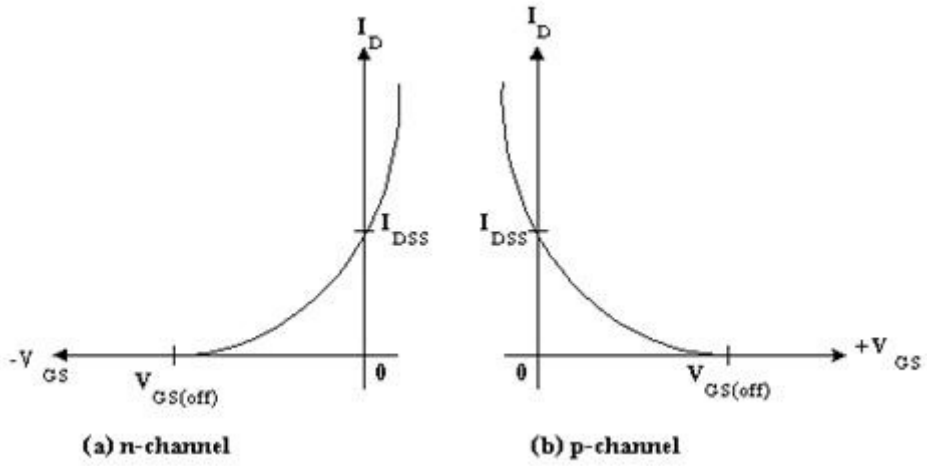


ก. ข.

รูป ที่ 6 แสดงสัญลักษณ์ของดีมอสเฟต N-Channel และ P-Channel

8. คุณลักษณะการถ่ายโอนของดีมอสเฟต

กราฟคุณลักษณะการถ่ายโอนของดีมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนลและพีแชนแนล แสดงดังรูปที่ 7 ก.,ข. ตามลำดับที่จุด $V_{GS} = 0$ V ของกราฟจะได้ค่าของ $I_D = I_{DSS}$ และเมื่อ $I_D = 0$ V จะได้ค่า $V_{GS\ (Off)}$ จะเป็นกรณีเอ็นแชนแนล, $V_{GS\ (Off)} = -V_{GS}$ และกรณีพีแชนแนล , $V_{GS\ (Off)} = +V_{GS}$ ดังรูปที่ 7



ก. ข.

รูป ที่ 7 แสดงกราฟคุณลักษณะการถ่ายโอนของดีมอสเฟตทั้งสองชนิด

9. การวัดและทดสอบเจเฟตด้วยโอห์มมิเตอร์

การตรวจสอบเจเฟตว่าดีหรือเสียด้วยใช้โอห์มมิเตอร์ กรณีที่รู้ตำแหน่งขาแล้วให้ตั้งตำแหน่งการวัดไปที่สเกล R x 10 เนื่องจากที่เกตและซอร์สและเกตกับเดรนเป็นรอยต่อพี-เอ็นเหมือนไดโอด ดังนั้นถ้าวัดค่าความต้านทานที่เกตกับซอร์ส หรือเกตกับเดรนครั้งหนึ่งแล้วกลับขั้วมิเตอร์ วัดที่ตำแหน่งเดิมอีกครั้งจะได้ค่าความต้านทานต่ำหนึ่งค่า กับค่าความ

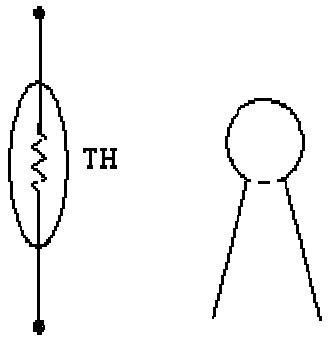
ต้านทานสูงหนึ่งค่า ถ้าวัดระหว่างซอร์สกับเดรนแล้วกลับขั้ววัดใหม่ อีกครั้งจะได้ค่าความต้านทานเท่ากันทั้งสองครั้ง ถ้าวัดได้ตามนี้แสดงว่าเจเฟตยังใช้งานได้

ในกรณีที่ไม่รู้ขาของเฟตและต้องการวัดหาขาของเฟตโดยไม่เปิดคู่มือโดย วิธี การวัดขาเป็นคู่ๆ (โดยใส่สเกล R x 10 เหมือน) พร้อมทั้งกลับขั้วของมิเตอร์ ถ้าคู่ใดกลับขั้วแล้ววัดได้ค่าความต้านทานเท่ากัน 2 ครั้ง ขาคู่นั้นคือ ขาซอร์สกับเดรนโดยขาร่วมเป็นขาเกต ถ้าขาร่วมเป็นศักย์ไฟบวกจากมิเตอร์ แสดงว่าเป็นแบบเอ็นแชนเนล ถ้าขาร่วมเป็นศักย์ไฟลบจากมิเตอร์แสดงว่าเป็นแบบพีแชนเนล แต่ไม่สามารถที่จะแยกได้ว่าขาใดเป็นขาซอร์สและขาเดรน นอกจากจะเปิดดูจากหนังสือคู่มือหรือทดลองให้ไบอัส สำหรับขาซอร์สและเดรนนี้เจเฟตบางตัวอาจใช้สลับกันได้ แต่บางเบอร์ก็มีโครงสร้างที่ไม่สามารถทำเช่นนี้ได้

เทอร์มิสเตอร์และวาริสเตอร์

1.โครงสร้างและสัญลักษณ์ของเทอร์มิสเตอร์

เทอร์มิสเตอร์มาจากคำว่า Thermo + Resistor คำว่า Thermo นั้นหมายถึง ความร้อน ดังนั้น เทอร์มิสเตอร์จึงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “ตัวต้านทานความร้อน” (Thermal Resistor) เป็นอุปกรณ์สาร กึ่งตัวนำที่ทำมาจากโลหะออกไซด์ เช่น แมงกานีส, นิกเกิล, โคบอลด์, ทองแดงและยูเรเนียม เป็นต้น โดยสารเหล่านี้จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดังนั้น ไทริสเตอร์จึงมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตามอุณหภูมิโดยใช้ตัว ย่อ “TH”



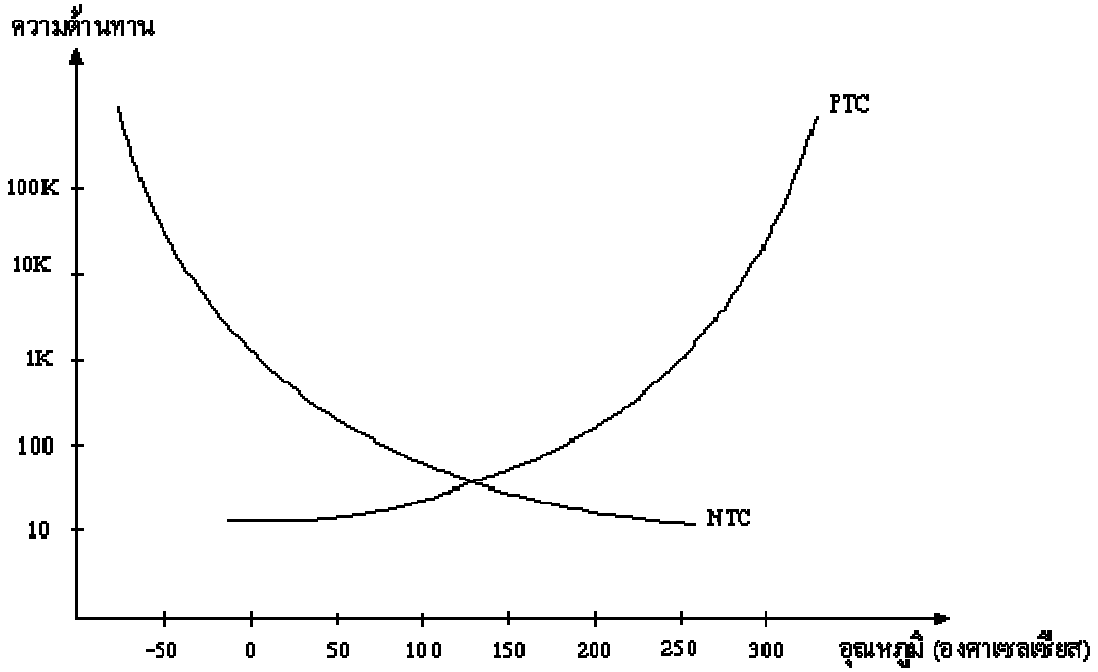
รูป ที่ 1 แสดงสัญลักษณ์และรูปร่างของเทอร์มิสเตอร์

เทอร์มิสเตอร์โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นเม็ดลูกปัดขนาดเล็กๆ จนถึงขนาด 1 นิ้ว และอีกแบบจะเป็นแบบแท่งยาวประมาณ 1/4 – 2 นิ้ว ส่วนค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์นั้นจะมีค่าโดยประมาณอยู่ในช่วง

2. ชนิดของเทอร์มิสเตอร์

1. NTC (Negative Temperature Coefficient) เป็นเทอร์มิสเตอร์แบบที่ค่าความต้านทานจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

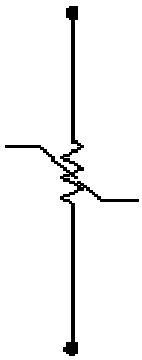
2. PTC (Positive Temperature Coefficient) เป็นเทอร์มิสเตอร์แบบที่ค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



รูป ที่ 2 แสดงกราฟคุณสมบัติของเทอร์มิสเตอร์ชนิด NTC และ PTC

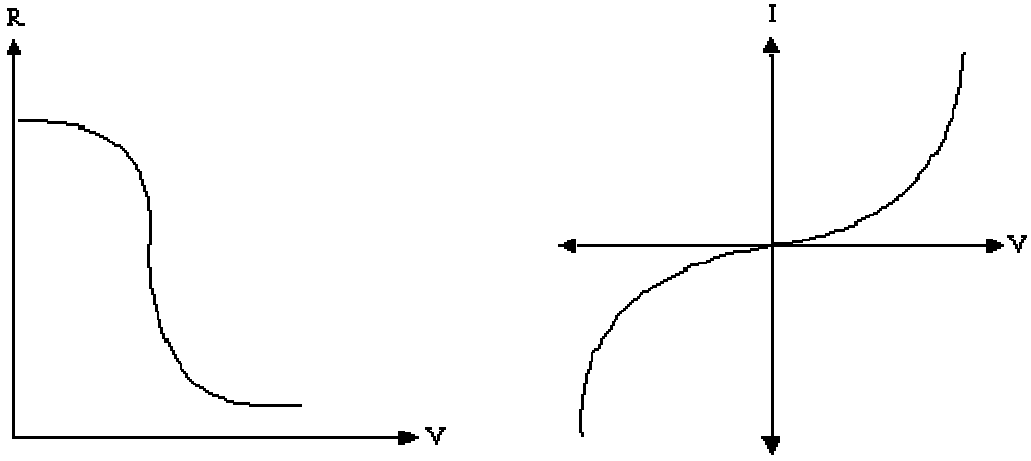
3. วาริสเตอร์ (Varistor)

วาริสเตอร์ (Varistor) หรือนิยมเรียกชื่อย่อ VDR (Voltage Dependence Resistor) คือตัวต้านทานที่แปรค่าตามค่าแรงดัน วาริสเตอร์จัดเป็นตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นโรงสร้างภายในลิตมาจากสาร กึ่งตัวนำ ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Sic) , สังกะสีออกไซด์ (Zno2) หรือไททาเนียมออกไซด์ (Tio2) โดยบดสารเหล่านี้ให้เป็นเซรามิก



รูป ที่ 3 แสดงสัญลักษณ์และรูปร่างของวาริสเตอร์

ลักษณะเด่นของตัวต้านทานที่แปรค่าตามแรงดันนี้คือ คุณสมบัติระหว่างความต้านทานต่อแรงดันนั้นจะสมมาตรกันและไม่ขึ้นกับขั้วของ แรงดันด้วย ดังรูปที่ 4 ถึงแม้ว่าในความเป็นจริงแล้วหน้าสัมผัสเดี่ยวใดๆ ของสารที่ใช้ทำตัวต้านทานจะยอมให้กระแสไหลผ่านได้ทางเดียวก็ตาม แต่การกระจายอย่างไม่เป็นระเบียบของหน้าสัมผัสจำนวนมากซึ่งต่ออนุกรมและขนาน กันมีผลทำให้เกิดการเรียงกระแสในทิศทางตรงกันข้ามมีจำนวนเท่าๆ กัน ดังนั้นตัวต้านทานชนิดนี้จึงสามารถนำไปใช้งานที่เกี่ยวกับไฟกระแสสลับ ซึ่งไดโอดที่นิยมนำมาใช้ป้องกันไม่สามารถใช้งานได้ การทำงานของวาริสเตอร์นั้นสามารถทำความเข้าใจได้ง่ายโดยพิจารณาว่าเป็นซี เนอร์ไดโอดสองตัวต่อหลังชนกัน เมื่อค่าแรงดันที่ป้อนให้วาริสเตอร์ต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ กระแสจะไหลได้น้อยเนื่องจากค่าความต้านทานที่สูง เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานจะลดลงและกระแสจะเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะ คลื่น เอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) ดังรูปที่ 4



รูป ที่ 4 กราฟความสัมพันธ์แรงดัน ความต้านทานและกระแสของวาริสเตอร์

ส่วนผสม	**β**	**ช่วงแรงดัน**	**การนำไปใช้งาน**
สังกะสีออกไซด์ (Zno)	0.025	50 – 500 V	การจัดสัญญาณรบกวนที่เป็นพัลส์กำลังงานสูง
ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC)	0.3	5 – 25 KV	การใช้งานต่อเนื่อง เช่น ในวงจรรักษาระดับแรงดัน
ไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2)	0.25	27 – 70 V	ป้องกันอุปกรณ์ที่มีระดับแรงดันต่ำ

ตาราง ที่ 1 วาริสเตอร์ชนิดต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัน (V) และกระแส (I) ของวาริสเตอร์สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$V = CI\beta$$

เมื่อ V คือ ค่าของแรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

C และ β เป็นค่าคงที่ของสารที่ใช้ทำตัวต้านทาน

ในทางปฏิบัติค่าของ C อยู่ในช่วง 14 จนถึง 3000 การเลือกใช้ชนิดของวาริสเตอร์ให้เหมาะสมกับงานนั้น ไม่จำเป็นที่เราต้องรู้คุณสมบัติของมันอย่างแท้จริงเพียงแต่รู้ข้อมูลบางอย่างเช่น

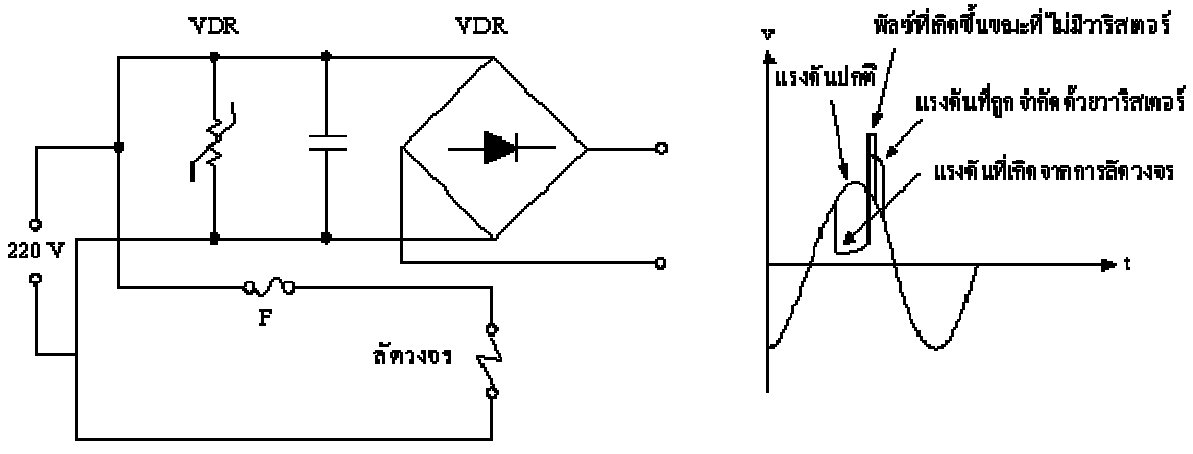
1. ระดับแรงดันช่วงที่วาริสเตอร์เริ่มทำงาน ซึ่งความแหลมของช่วงแรงดันนี้เป็นคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับสารที่ใช้ทำ ยกตัวอย่างเช่น วาริสเตอร์ที่ทำจากสังกะสีออกไซด์จะมีช่วงแรงดันที่แหลมกว่าชนิดที่ทำจากซิลิกอนคาร์ไบด์ ส่วนวาริสเตอร์ที่ทำจากไททาเนียมออกไซด์จะมีช่วงแรงดันค่อนข้างต่ำ ประมาณ 2.7 โวลต์ แรงดันช่วงที่วาริสเตอร์เริ่มทำงานนี้จะถูกกำหนดมา สำหรับค่ากระแสที่เหมาะสมซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของวาริสเตอร์

2. β ค่า คงที่นี้มีค่าน้อยมากสำหรับวาริสเตอร์ที่ทำจากสังกะสีออกไซด์ ซึ่งหมายความว่า ถึงแม้ว่าจะเพิ่มค่าแรงดันเป็นจำนวนน้อยแต่จะก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้น ของกระแสอย่างมากมาย

3. การใช้งานอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีความสำคัญเมื่อใช้วาริสเตอร์ในวงจรรักษาระดับแรงดันหรือวงจรที่มี อัตราการส่งพัลส์อย่างเร็วมาก

การประยุกต์ใช้งาน

วาริสเตอร์นั้นถูกนำไปใช้ในการกำจัดสัญญาณรบกวนที่เป็นพัลส์กำลังงานสูงโดยเฉพาะเช่น พัลส์รบกวนที่เกิดจากฟ้าผ่า หรืออื่นๆ ที่เกิดขึ้นในวงจรที่มีตัวเหนี่ยวนำถูกเปิดวงจร การตัดต่อนี้อาจจะเป็นผลจากสวิตช์ ฟิวส์หรือจากสารกึ่งตัวนำที่เป็นไทริสเตอร์ เราอาจจะคิดว่าไม่มีปัญหาเกิดขึ้นเนื่องจากอุปกรณ์นี้จะเปิดวงจรเฉพาะจุดที่ แรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงไม่น่าที่จะมีแรงดันเหนี่ยวนำเกิดขึ้น ในขณะเดียวกับที่กระแสลดลงต่ำกว่าค่ายึดซึ่งเป็นค่ากระแสที่จำเป็นสำหรับรักษาให้ไทริสเตอร์ยังคงนำกระแสอยู่ ค่ากระแสยึดมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจำนวนเล็กน้อยขึ้นในหลายๆ กรณี พลังงานสนามแม่เหล็กซึ่งเท่ากับ 1/2 LI2 จะถูกกระจายผ่านไดโอดและส่วนของความต้านทานที่เกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยตัว เองโดยที่ I เป็นค่ากระแสในขณะตัดวงจรและ L เป็นค่าความเหนี่ยวนำทั้งหมดของวงจรเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำด้วยตัวเอง ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการควบคุมทางด้านไฟกระแสสลับจึงทำให้ไม่สามารถใช้ไดโอด ได้ ดังนั้นวาริสเตอร์จึงเป็นหนทางเดียวที่จะแก้ไขปัญหานี้ได้



รูป ที่ 6 เมื่อฟิวส์ตัดวงจรแรงดันของแหล่งจ่ายไฟจะสูงขึ้นทันทีทันใด ถ้าไม่มีการป้องกันไว้ อุปกรณ์ต่างๆ อาจเสียหายได้

สิ่งที่ควรคำนึงในการเลือกใช้วาริสเตอร์สำหรับงานเฉพาะ คือ

1. แรงดันที่เป็นยอด ซึ่งอุปกรณ์ที่ถูกป้องกันสามารถทนได้โดยไม่เกิดการเสียหาย นั้นจะต้องเลือกวา ริสเตอร์ที่มีค่าแรงดันเริ่มทำงานต่ำกว่าแรงดันที่เป็นยอดนี้

2. ค่าแรงดันสูงสุด (V_P) ที่ตกคร่อมวาริสเตอร์ภายใต้เงื่อนไขปกติ (ในงานเกี่ยวกับไฟกระแสสลับค่า V_P = 1.414 Vrms) เป็นสิ่งที่ต้องจำไว้ว่ากระแสที่ไหลผ่านวาริสเตอร์ที่ระดับแรงดันขนาดนี้จะ ต้องต่ำกว่า 1 มิลลิแอมป์

3. ค่ากระแสทรานซิสเตอร์สูงสุด

4. ค่ากำลังงานที่กระจายในตัววาริสเตอร์ ระหว่ามีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นเมื่อตัววาริสเตอร์ ต่อคร่อมตัวเหนี่ยวนำอยู่ค่ากำลังงานนี้จะต้องน้อยกว่า 1/2 LI2

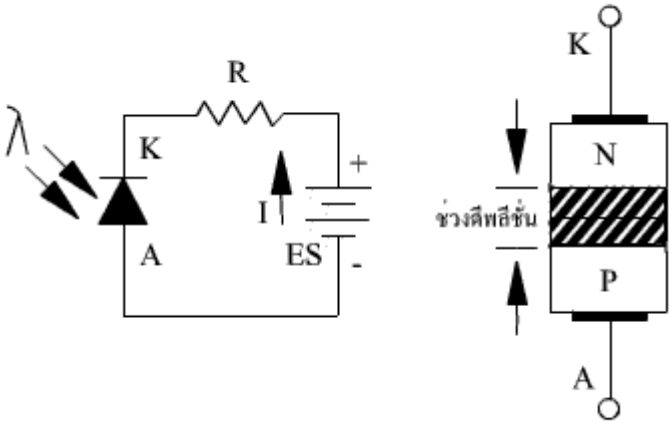
5. การกระจายกำลังงานเฉลี่ยโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าอัตราส่งพัลส์มีค่าสูงหรือถ้าแรงดันเริ่มทำงานไม่สูงเกินกว่าค่าแรงดัน ปฏิบัติงานในสภาวะปกติ

อุปกรณ์โฟโต้

1. โฟโต้ไดโอด(Photo Diode)

โฟโต้ ไดโอด (Photo Diode) เป็นอุปกรณ์เชิงแสงชนิดหนึ่ง ที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด P และสารกึ่งตัวนำชนิด N รอยต่อจะถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุที่แสงผ่านได้ เช่น กระจกใส โฟโต้ไดโอดจะมีอยู่ 2 แบบ คือแบบที่ตอบสนองต่อแสงที่เรามองเห็น และแบบที่ตอบสนองต่อแสงในย่านอินฟาเรด ในการรับใช้งานจะต้องต่อโฟโต้ไดโอดในลักษณะไบอัสกลับ

โฟโต้ ไดโอด (Photo Diode) จะยอมให้กระแสไหลผ่านได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มของแสง เมื่อโฟโต้ไดโอดได้รับไบอัสกลับ (Reverse Bias) ด้วยแรงดันค่าหนึ่ง และมีแสงมาตกกระทบที่บริเวณรอยต่อ ถ้าแสงที่มาตกกระทบมีความยาวคลื่นหรือแลมด้าที่เหมาะสมจะมีกระแสไหลในวงจร โดยกระแสที่ไหลในวงจร จะแปรผกผันกับความเข้มของแสงที่มาตกกระทบ ลักษณะทั่วไปขณะไบอัสตรง (Forward Bias) จะยังคงเหมือนกับไดโอดธรรมดาคือยอมให้กระแสไหลผ่านได้



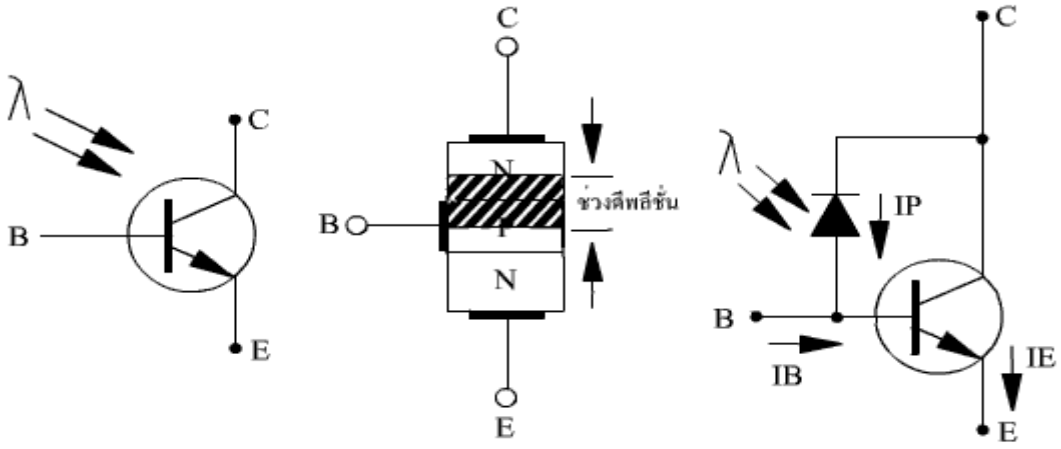
รูป ที่ 1 แสดงสัญลักษณ์ และการไบอัสใช้งาน

โฟโต้ไดโอดเมื่อเทียบกับ LDR (ตัวต้านทานที่แปรค่าตามแสง) แล้วโฟโต้ไดโอดมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเร็วกว่า LDR มาก จึงนิยมนำไปประยุกต์งานในวงจรที่ต้องการความเร็วสูง เช่น เครื่องนับสิ่งของ, ตัวรับรีโมทคอนโทรล, วงจรกันขโมยอินฟาเรดเป็นต้น

เนื่องจากโฟโต้ไดโอดให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อแสงต่ำ คืออยู่ในช่วง 1-10 ต A เท่านั้น ดังนั้นการใช้งานโฟโต้ไดโอดจึงต้องมีตัวขยายกระแสเพิ่มเติม ผู้ผลิตจึงหันมาใช้ทรานซิสเตอร์เป็นตัวขยายกระแสเพิ่มเติมอยู่ในตัวถังเดียว กัน ซึ่งเรียก ว่าโฟโต้ทรานซิสเตอร์ (Photo Transistor)

2. โฟโต้ทรานซิสเตอร์ (Photo Transistor)

โฟโต้ทรานซิสเตอร์ (Photo Transistor) จะประกอบด้วยโฟโต้ไดโอดซึ่งจะต่ออยู่ระหว่างขาเบสกับคอลเล คเตอร์ ของทรานซิสเตอร์ ดังรูป 2 กระแสที่เกิดขึ้นจากาการเปลี่ยนแปลงของแสงจะถูกขยายด้วยทรานซิสเตอร์ (Transistor) ในการใช้งานโฟโต้ทรานซิสเตอร์ รอยต่อระหว่างเบส-อิมิตเตอร์ (Base-Emitter) จะต่อ ไบอัสกลับ (Reverse Bias) ที่รอยต่อนี้เองเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการแปลงค่ากระแสที่ขึ้นอยู่กับความเข้ม แสง



รูป ที่ 2 แสดงสัญลักษณ์ โครงสร้าง และวงจรสมมูล ของโฟโต้ทรานซิสเตอร์

เมื่อไบอัสกลับ (Reverse Bias) ที่รอยต่อระหว่างเบสกับคอลเลคเตอร์ (Base-Collecter) และมีแสงตกกระทบที่บริเวณรอยต่อ กระแสอันเนื่องจากแสง (I_P) จะถูกขยายด้วยอัตราขยายของทรานซิสเตอร์เป็นกระแสอิมิตเตอร์ (I_E) และถ้าไบอัสตรงที่ขาเบสด้วยกระแสเบส (I_B) จากภายนอกก็จะถูกขยายรวมกับกระแสเนื่องจากแสง (I_P) ด้วย

ถ้า ให้ I_P = กระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสง

I_B = กระแสเบสที่มาจาก ภายนอก

I_E = กระแสอิมิตเตอร์

h_{fe} = อัตราขยายของทรานซิสเตอร์

จากสมการของทรานซิสเตอร์คือ

$$I_C = h_{fe} I_B$$

และ

$$I_E = I_C + (I_B \pm I_P)$$

จะได้

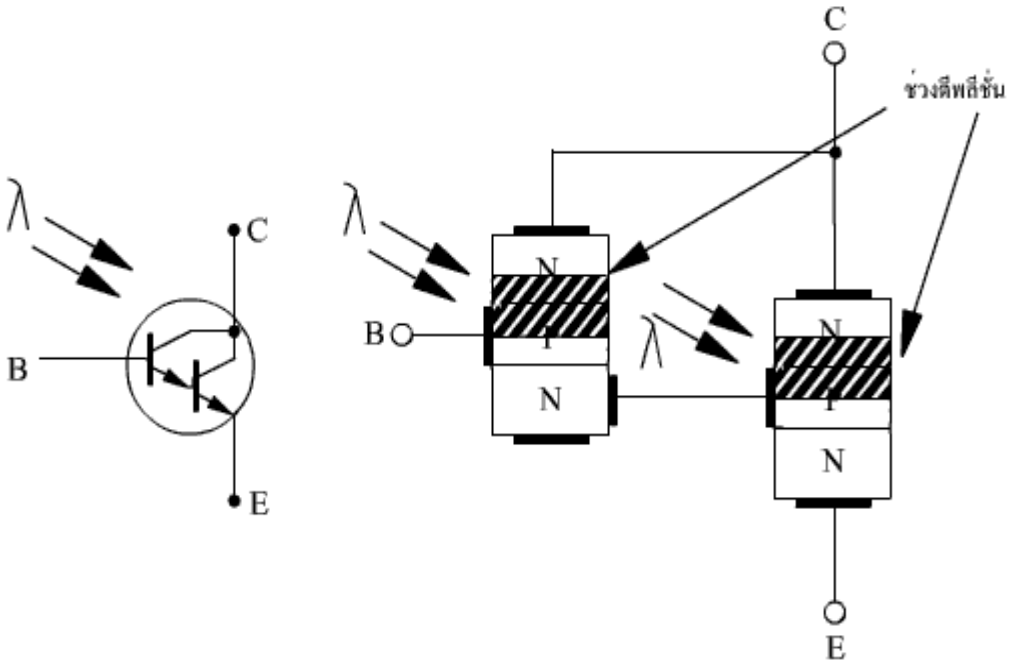
$$I_E = I_C + (I_B \pm I_P) h_{fe} + I$$

จะเห็นได้ว่ากระแส I_E เปลี่ยนแปลงตามกระแส I_P ด้วยอัตราขยายถึง $h_{fe}+1$ เท่าซึ่งถ้า I_P มีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 1-10ตA และทำให้ h_{fe} มีค่าประมาณ 100 จะได้ค่า I_E เปลี่ยนแปลงจาก 100 ตA ถึง 1mA

อัตราขยายกระแสยิ่งสูงจะทำให้ผลตอบสนองต่อแสงจะไวขึ้น ค่า h_{fe} สูงๆ จะต้องทำให้รอยต่อระหว่างเบสกับคอลเล็กเตอร์มีพื้นที่มาก แต่ก็ทำให้กระแสรั่วไหลสูงขึ้นด้วย เพราะรอยต่อจะถูกไบอัสกลับ (Revese Bias)

3. โฟโต้ดาร์ลิงตันทรานซิสเตอร์ (Photo DaringtonTransistor)

โฟโต้ดาร์ลิงตันทรานซิสเตอร์ (Photo DaringtonTransistor) คือโฟโต้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวต่อร่วมกันในลักษณะวงจรดาร์ลิงตัน คือต่อในลักษณะขาอิมิตเตอร์(Emitter) ของตัวหนึ่งจะต่อเข้ากับเบส (Base) ของตัวถัดไป ลักษณะการต่อเช่นนี้จะทำให้ทรานซิสเตอร์มีอัตราการขยายสูงขึ้นอีกมาก



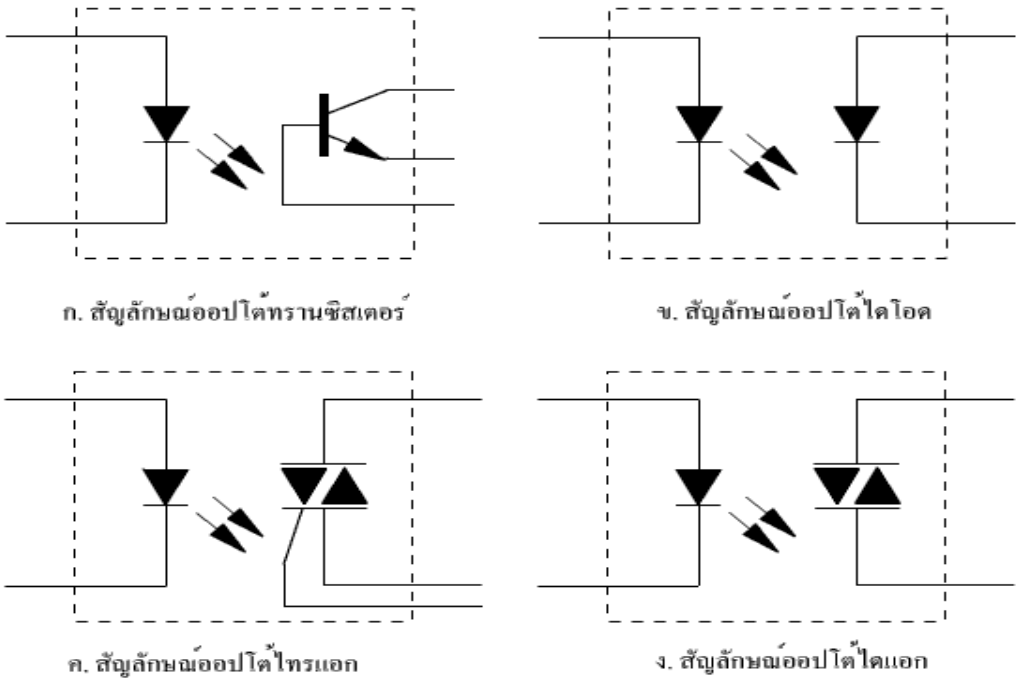
รูปที่ 3 แสดงสัญลักษณ์ และโครงสร้างของโฟโต้ดาร์ลิงตันทรานซิสเตอร์

ออปโต้คัปเปลอร์ (Opto-Coupler)

อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง(Opto-Isolator) หรือที่เรียกว่าออปโต้คัปเปลอร์ (Opto-Coupler) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อทางแสงโดยใช้หลักการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสง และเปลี่ยนกลับจากแสงเป็นไฟฟ้าตามเดิม ใช้สำหรับการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างสองวงจรที่ต้องการแยกทางไฟฟ้าอย่างเด็ด ขาดเพื่อป้องกันการรบกวนกันทางไฟฟ้า แบ่งออกเป็นหลายชนิดแต่ละชนิดจะประกอบด้วย LED ส่งแสงซึ่งปติจะเป็นชนิดอินฟาเรดและตัวรับแสงที่เป็นโฟโต้ทรานซิสเตอร์หรือโฟโต้ไดโอด โดยจะถูกผลิตรวมอยู่ในตัวเดียวกัน

1. โครงสร้างสัญลักษณ์อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง

โครงสร้างสัญลักษณ์อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงจะเหมือนกับอุปกรณ์ประเภทโฟโต้ แต่จะเพิ่มอุปกรณ์ส่งแสงอินฟาเรดคือไดโอดเปล่งแสงอินฟาเรดเข้าไปอีกหนึ่งตัว เช่นโฟโต้ทรานซิสเตอร์จะเพิ่มไดโอดเปล่งแสงอินฟาเรดเข้าไปอีกหนึ่งตัวจะได้ ออปโต้ทรานซิสเตอร์ อุปกรณ์ออปโต้ตัวอื่นก็เช่นเดียวกัน



ก. สัญลักษณ์ออปโต้ทรานซิสเตอร์ ข. สัญลักษณ์ออปโต้ไดโอด

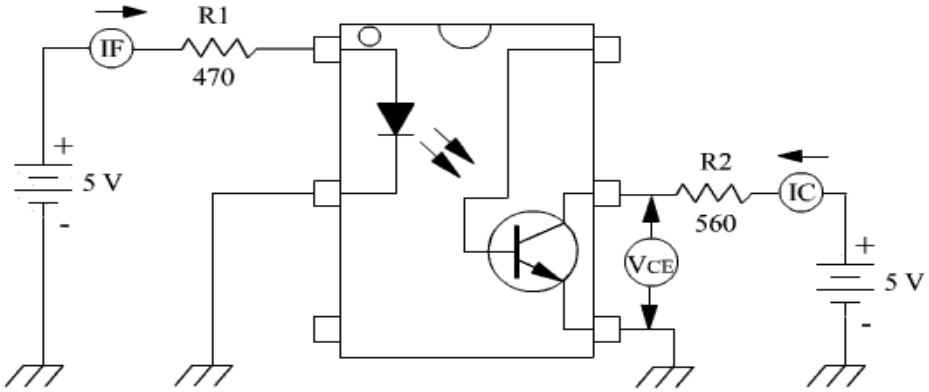
ค. สัญลักษณ์ออปโต้ไทรแอก ง. สัญลักษณ์ออปโต้ไดแอก

รูป ที่ 1 แสดงสัญลักษณ์อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงชนิดต่างๆ

ปัจจุบันอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงถูกสร้างขึ้นมาในรูปของไอซี 6 ขาปิดทึบภายใน ด้านอินพุตจะเป็นแอลอีดีอินฟาเรด (LED Infared) ส่วนทางด้านเอาท์พุตนั้นจะเป็นอุปกรณ์ประเภทโฟโต้ชนิด ต่างๆ ซึ่งมีอยู่มากมายเช่น โฟโต้ไดโอด

2. วงจรใช้งานออปโต้คัปเปลอร์

จากรูปที่ 2 ป็นวงจรใช้งานเบื้องต้นของออปโต้คัปเปลอร์โดยมีไดโอดเปล่งแสงเป็นอินพุต และโฟโต้ทรานซิสเตอร์เป็นเอาท์พุตของวงจร เมื่อมีกระแสไหลผ่าน LED โดยมี R_1 เป็นตัวจำกัดกระแส LED จะส่องแสงไปที่โฟโต้ทรานซิสเตอร์ ทำให้โฟโต้ทรานซิสเตอร์ นำกระแสมีแรงดันเอาท์พุตตกคร่อมที่ R_2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเอาท์พุตของวงจรจะถูกควบคุมโดยอินพุตโดยทั้งอินพุตและเอาท์พุตแยกกันทางไฟฟ้าโดยสิ้นเชิง วงจรนี้นิยมนำไปใช้ในวงจรควบคุมแรงดันแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่งในเครื่องรับ โทรทัศน์ วงจรควบคุมไฟวิ่งวัตต์สูง เป็นต้น



รูป ที่ 2 แสดงวงจรใช้งานออปโต้คัปเปลอร์เบื้องต้น

หัวใจสำคัญของอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงนั้นคือ “ Cerrent Transfer Ratio” (CTR) ซึ่งก็หมายถึงอัตราส่วนระหว่างกระแสอินพุต (I_{in}) ต่อกระแสเอาท์พุต(I_{out}) ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$CTR = I_{IN}/I_{OUT}$$

คำถาม

1. ข้อใดคือข้อดีของ PUT ที่ดีกว่า UJT

ก. โปรแกรมและกำหนดค่าได้

ข. เลือกค่าอินทรินซิก สแตนออฟเรโชได้

ค. เลือกค่าความต้านทานระหว่างเบสได้

ง. ถูกทุกข้อ

2.วงจรสมมูลย์ของ PUT จะคล้ายกับอุปกรณ์ตัวใด

ก. DIAC

ข. TRIAC

ค. SCR

ง. UJT

3.จากรูปที่ 5.4ตัว PUT จะทำงานเมื่อไร

ก. ให้ R1 มีความต้านทานมาก R3 มีความต้านทานน้อย

ข. ให้ R1 มีความต้านทานมาก R2 มีความต้านทานน้อย

ค. ให้ R1 มีความต้านทานน้อย R3 มีความต้านทานมาก

ง. ให้มี R1 ไม่มีความต้านทานเลย R2 มีความต้านทานมาก

4.ไดแอก (DIAC)มีการนำกระแสได้กี่ทิศทาง

ก. ทิศทางเดียว

ข. 2 ทิศทาง

ค. 3ทิศทาง

ง. ไม่มีข้อใดถูกต้อง

5.ไตรแอกเมื่อทำงานเป็นสวิตซ์จะดีกว่าสวิตซ์แบบกลไกในข้อใด

ก. ทำงานได้รวดเร็ว

ข. ไม่มีการสัมผัสกันของหน้าสัมผัส

ค. ทำให้ทำงานได้ง่ายและรวดเร็ว

ง. ถูกทุกข้อ

6.จากรูปที่ 3.17 ตัวไดแอกจะทำงาน เมื่อได้รับการจ่ายแรงดันจากอุปกรณ์ตัวใด

ก. R1

ข. R2

ค. C1

ง. R1และ R2

7. SCR ถูกนำไปใช้มากในงานจำพวกไฟฟ้ากำลัง เช่นงานอะไรบ้าง

ก. วงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์

ข. วงจรควบคุมเวลา

ค. วงจรควบคุมสัญญาณไฟจราจร

ง. ไม่มีข้อใดถูกต้อง

8.ควอดแดรก แตกต่างจากไตรแอกในข้อใด

ก. การใช้งานไม่ต้องต่อไดแอก

ข. ทำงานได้ทั้งแรงดันไฟตรงและไฟสลับ

ค. แรงดันกระตุ้นขา G เป็นบวกหรือลบก็ได้

ง. ถูกทุกข้อ

9.UJT ใช้ในงานอะไรได้บ้าง

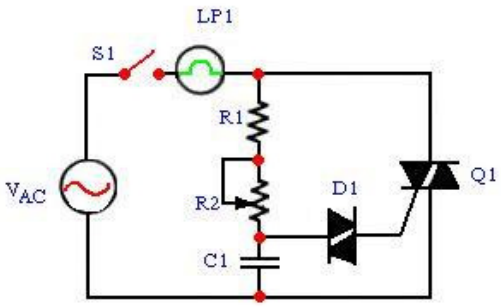
ก. วงจรกำเนิดสัญญาณ ฟันเลื่อย

ข. วงจรควบคุมเฟส

ค. วงจรหน่วงเวลา

ง. ถูกทุกข้อ

10. ภาพนี้เป็นวงจรใด



ก. วงจรไฟจราจร

ข. วงจรหน่วงเวลา

ค. วงจรหรี่ไฟ

ง. วงจรไฟสลับ