บทที่ 2
การใช้งานโปรแกรมเบื้องต้นและทฤษฎีพื้นฐานที่สำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

1. กล่าวนำ

ปัจจุบัน วงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์อาจประกอบขึ้นจากอุปกรณ์ไฟฟ้าเพียง 2-3 ตัวหรืออาจต้องใช้อุปกรณ์มากเป็น 2-3 ล้านตัว ก็ได้ การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยมือเปล่าอาจไม่สามารถทำได้เหมือนเช่นแต่ก่อนเพราะมีความยาก-ซับซ้อนและใช้เวลามาก กว่าจะได้คำตอบที่ต้องการ

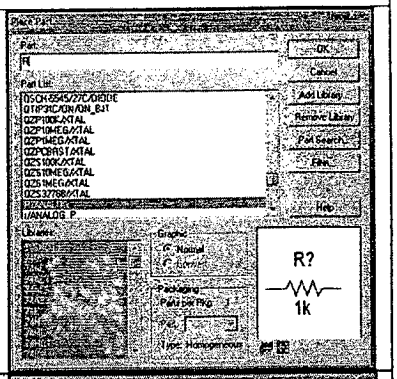
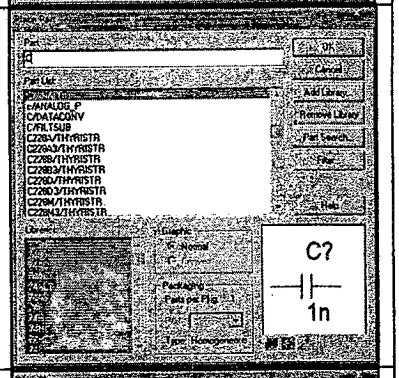
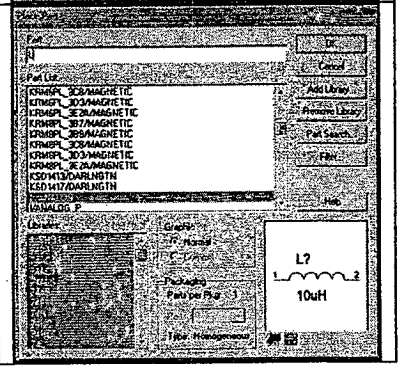
- โปรแกรมจำลองการทำงาน (Simulation Program) ถูกพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกในช่วงต้นปี ค.ศ. 1970s โดยนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์ ประเทศสหรัฐอเมริกา (University of California, Berkeley, USA) ในครั้งนั้นได้พัฒนาขึ้นด้วยภาษา FORTRAN ที่เป็นโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์แบบเมนเฟรม (main-frame computer) และตั้งชื่อโปรแกรมว่า SPICE ซึ่งย่อมาจาก Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis (SPICE) จากนั้นได้พัฒนาความสามารถในการวิเคราะห์วงจรพร้อมปรับเปลี่ยนเป็นเวอร์ชัน SPICE2 อยู่ในรูปของ text editor นับจากนั้นเป็นต้นมาโปรแกรมก็มีถูกพัฒนาขึ้นเป็นลำดับ เช่น โปรแกรม PSPICE ได้พัฒนาโดยบริษัท MicroSim Corporation ให้สามารถทำงานได้หลากหลายบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลในปี 1984 (Personal Computer: PC) เครื่อง Macintoshes, และ Mini-computer เป็นต้น โดยเฉพาะที่พัฒนาบน PC เป็นโปรแกรมบนระบบปฏิบัติการวินโดว์ อีกทั้งมีเวอร์ชันสำหรับภาคการศึกษา (educational version) นับจากนั้นโปรแกรม PSPICE ก็ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลาย โปรแกรม PSPICE มีการแสดงผลเป็นกราฟ (graphical postprocessor: Probe) มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบวงจรจาก text editor ซึ่งเป็นตัวหนังสือมากำหนดเป็นการเขียนวงจรแบบ graphical interface ที่เรียกว่า Schematic เพื่อให้ง่ายต่อการเขียนวงจรและสะดวกต่อการตรวจสอบความถูกต้อง ด้วยความหลากหลายในการจำลองการทำงานทั้งวงจรแอนะลอกและดิจิตอล บางครั้งอาจเรียกโปรแกรมนี้ว่า PSpice A/D จากนั้นพัฒนาเรื่อยมาจนถึงเวอร์ชัน 8 และถูกควบรวมกิจการโดย OrCAD พร้อมทั้งเปลี่ยนเป็นเวอร์ชัน 9 ในนาม OrCAD PSpice A/D และมีการปรับปรุง Schematic โดยเรียกชื่อใหม่ว่า Schematic Capture จากนั้นก็ได้พัฒนาภายใต้ชื่อ OrCAD เวอร์ชันต่างๆ จนบริษัท CADENCE ได้เข้าซื้อกิจการพร้อมกับเปลี่ยนชื่อเป็น Cadence OrCAD ล่าสุดโปรแกรมได้ถูกพัฒนาเป็นเวอชัน Cadence OrCAD16.6 ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้ที่เวฟไซท์ (http://www.cadence.com/products/orcad/pages/downloads.aspx) นอกจากนี้ เรายังอาจพบ SPICE อยู่ในรูปทางการค้าอื่นๆ เช่น HSPICE และ B^2SPICE เป็นต้น

การใช้โปรแกรมจำลองการทำงานมีข้อดีหลายอย่าง เช่น ช่วยหาคำตอบของกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ แรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ หรือค่ากำลังงานที่เกิดขึ้นหรือที่สูญเสียในอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในวงจรได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้แล้ว เรายังสามารถใช้โปรแกรมช่วยจำลองการทำงานของอุปกรณ์หรือวงจรโดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้โดยไม่ต้องกังวลความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์หรือวงจร ซึ่งต่างจากการต่อวงจรจริง อีกทั้ง การจำลองการทำงานสามารถช่วยยืนยันได้ว่าวงจรที่ออกแบบมีสมรรถนะเป็นตามที่ต้องการหรือไม่ อย่างไร หากไม่เป็นดังต้องการ เราสามารถปรับแก้ไขวงจรได้ ก่อนนำไปสร้างวงจรจริงและทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของวงจร

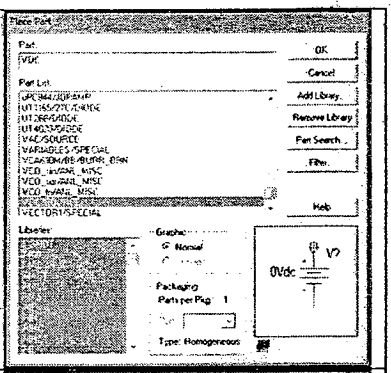
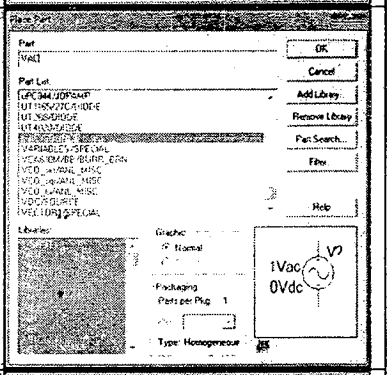
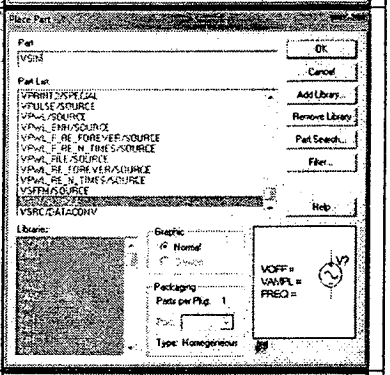
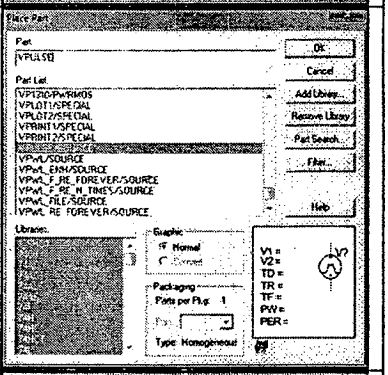
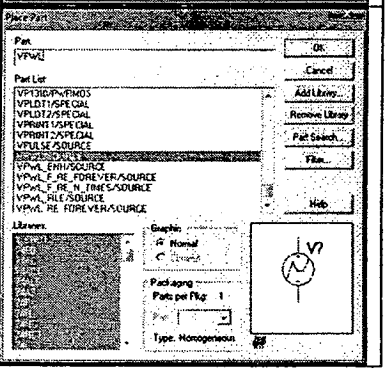
2. ข้อตกลงที่สำคัญและการใช้งานโปรแกรมเบื้องต้น

2.1 สัญลักษณ์ของอุปกรณ์

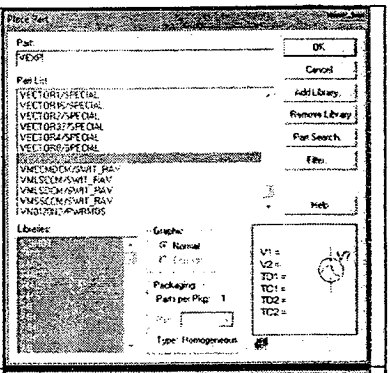
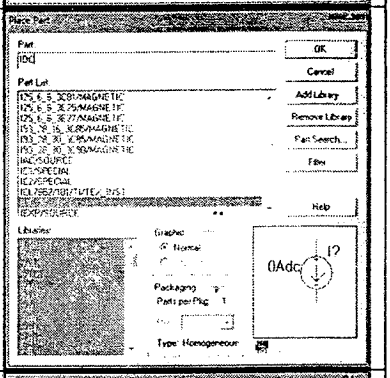
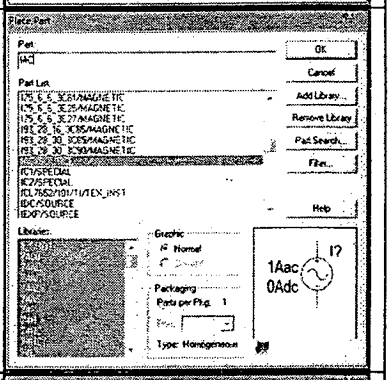
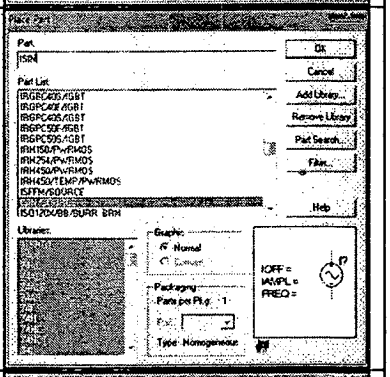
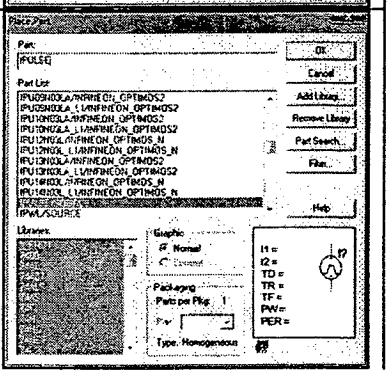
ตารางที่ 1 ตัวอย่างสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้บ่อยในโปรแกรม

รายชื่ออุปกรณ์	ชื่อ Part	สัญลักษณ์
ตัวต้านทาน	R	
ตัวเก็บประจุ	C	
ตัวเหนี่ยวนำ	L	

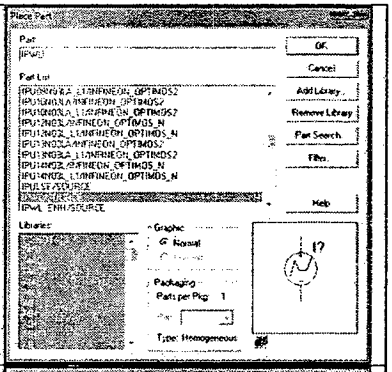
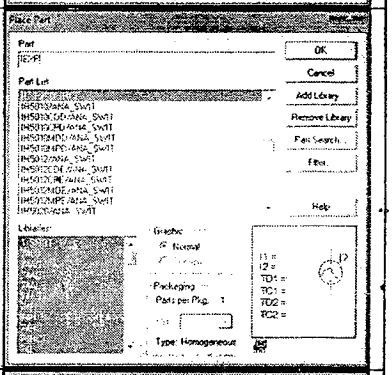
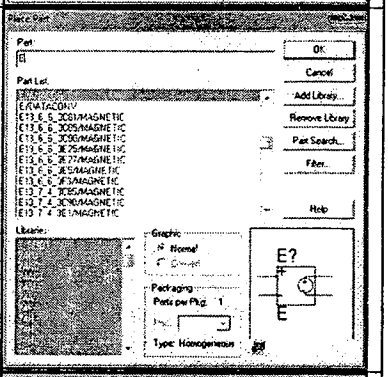
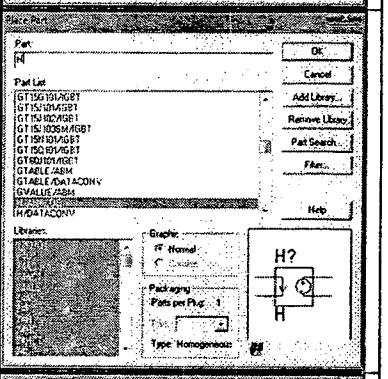
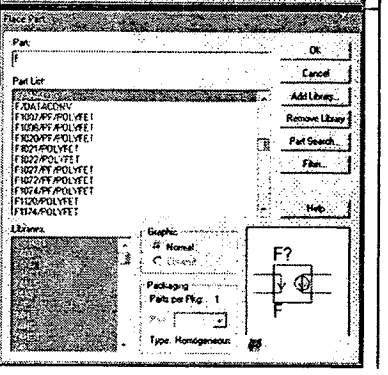
ตารางที่ 1 (ต่อ) ตัวอย่างสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้บ่อยในโปรแกรม

แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง	Vdc	
แหล่งจ่ายแรงดันไฟสลับ	Vac	
แรงดันสัญญาณรูปไซน์	Vsin	
แรงดันสัญญาณรูปพัลส์	Vpulse	
แรงดันสัญญาณpiece wise linear	Vpwl	

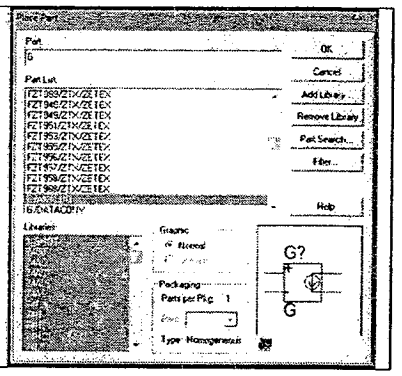
ตารางที่ 1 (ต่อ) ตัวอย่างสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้บ่อยในโปรแกรม

แรงดันสัญญาณเอ็กซ์โพเนนเชียล	Vexp	
แหล่งจ่ายกระแสไฟตรง	Idc	
แหล่งจ่ายกระแสไฟสลับ	Iac	
กระแสสัญญาณรูปไซน์	Isin	
กระแสสัญญาณรูปพัลส์	Ipulse	

ตารางที่ 1 (ต่อ) ตัวอย่างสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้บ่อยในโปรแกรม

กระแสสัญญาณ piece wise linear	Ipwl	
กระแสสัญญาณเอ็กซ์โพเนนเชียล	Iexp	
แหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน	Voltage controlled voltage source: E	
แหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยกระแส	Current controlled voltage source: H	
แหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยกระแส	Current controlled current source: F	

ตารางที่ 1 (ต่อ) ตัวอย่างสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้บ่อยในโปรแกรม

แหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน	Voltage controlled current source: G	

2.2 หน่วยที่มาตรฐานที่ใช้

ตารางที่ 2 ตัวอย่างหน่วยมาตรฐานทางวิศวกรรมศาสตร์ที่ใช้บ่อยในโปรแกรม

ชื่อหน่วย	ค่า	ตัวแปรที่ใช้
เฟมโต (femto)	1E-15	f
พิโค (pico)	1E-12	P
นาโน (nano)	1E-9	n
ไมโคร (micro)	1E-6	u
มิลลิ (milli)	1E-3	m
กิโล (kilo)	1E+3	K
เมกกะ (mega)	1E+6	MEG
กิกะ (giga)	1E+9	G
เทอรา (tera)	1E+12	T

2.3 ข้อห้ามและข้อจำกัดของเวอร์ชันทดลองใช้

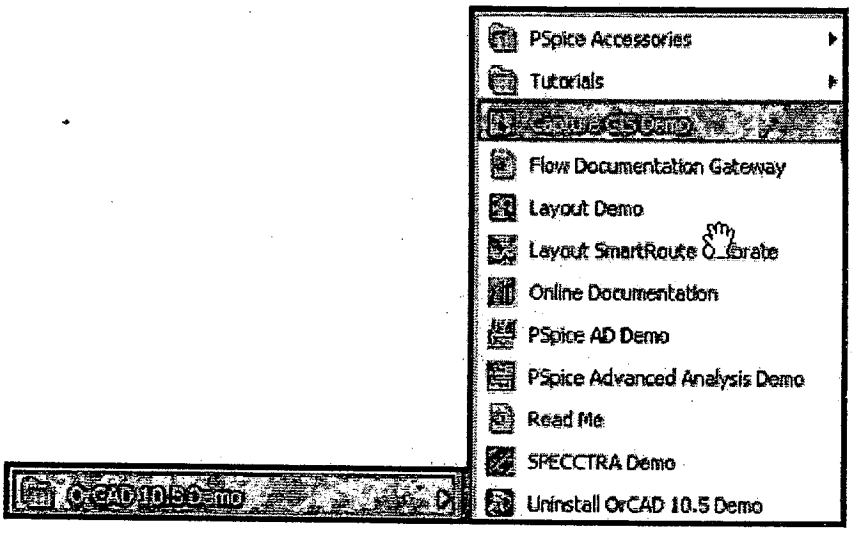
- ชื่อของตัวต้านทานที่ใช้ต้องขึ้นต้นด้วยพยัญชนะตัว R เท่านั้น
- ชื่อของตัวเก็บประจุที่ใช้ต้องขึ้นต้นด้วยพยัญชนะตัว C เท่านั้น
- ชื่อของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ต้องขึ้นต้นด้วยพยัญชนะตัว L เท่านั้น
- ชื่อของแหล่งจ่ายแรงดันแบบอิสระ (independent voltage source) ที่ใช้ต้องขึ้นต้นด้วยพยัญชนะตัว V เท่านั้น
- ชื่อของแหล่งจ่ายกระแสแบบอิสระ (independent current source) ที่ใช้ต้องขึ้นต้นด้วยพยัญชนะตัว I เท่านั้น
- พยัญชนะตัวเล็กกับตัวใหญ่มีค่าและความหมายเหมือนกัน

- การใช้ตัวพยัญชนะห้ามมีการเว้นวรรค ห้ามใช้เครื่องยติภังค์ (hyphen) แต่สามารถใช้เครื่องหมายขีดล่างได้ (underscore)
- ห้ามใช้เครื่องหมายขีดล่างขึ้นหน้าพยัญชนะ
- ห้ามใช้เครื่องหมาย # (number sign)
- การต่อวงจรในการจำลองแต่ละครั้งมีจำนวนโหนดไม่เกิน 64 โหนด
- ออปแอมป์ใช้งานได้ไม่เกิน 2 ตัว
- ทรานซิสเตอร์ใช้งานได้ไม้เกิน 10 ตัว
- สายนำสัญญาณทั้งแบบอุดมคติและแบบไม่เป็นอุดมคติใช้งานรวมกันได้ไม่เกิน 10 เส้น
- อุปกรณ์ดิจิตอลแบบดั้งเดิมใช้งานรวมกันได้ไม่เกิน 65 ตัว
- ไลบรารีของอุปกรณ์แอนะลอกมีจำนวน 39 ไลบรารี
- ไลบรารีของอุปกรณ์ดิจิตอลมีจำนวน 134 ไลบรารี
- ถ้าอุปกรณ์ที่ใช้ในการวาด schematic ไม่เกิน 15 parts สามารถบันทึก (save) ไฟล์ได้ ในทางตรงข้าม เราสามารถที่จะวาดอุปกรณ์มากกว่านั้นได้ แต่จะไม่สามารถบันทึกไฟล์ได้

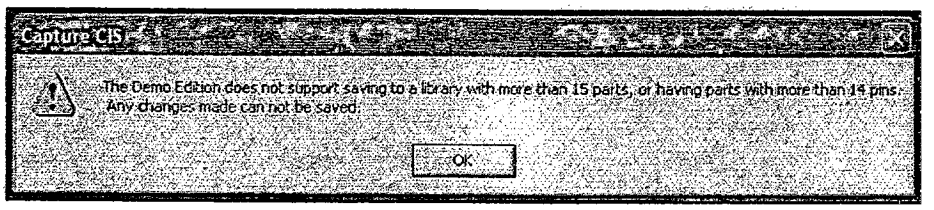
2.4 การเรียกใช้โปรแกรมและการใช้งานเมนูย่อย

- **ขั้นตอนการเรียกใช้โปรแกรม**

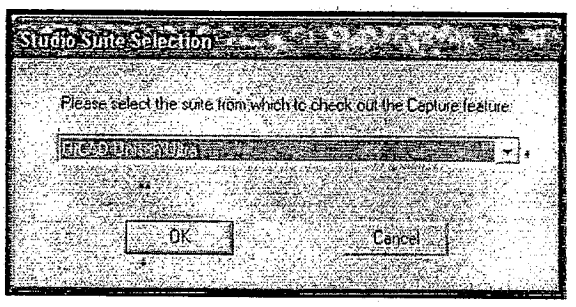
ก) Start->OrCAD 10.5->Capture CIS Demo



จากนั้นจะแสดงข้อจำกัดของเวอร์ชันสาธิต (demo version)



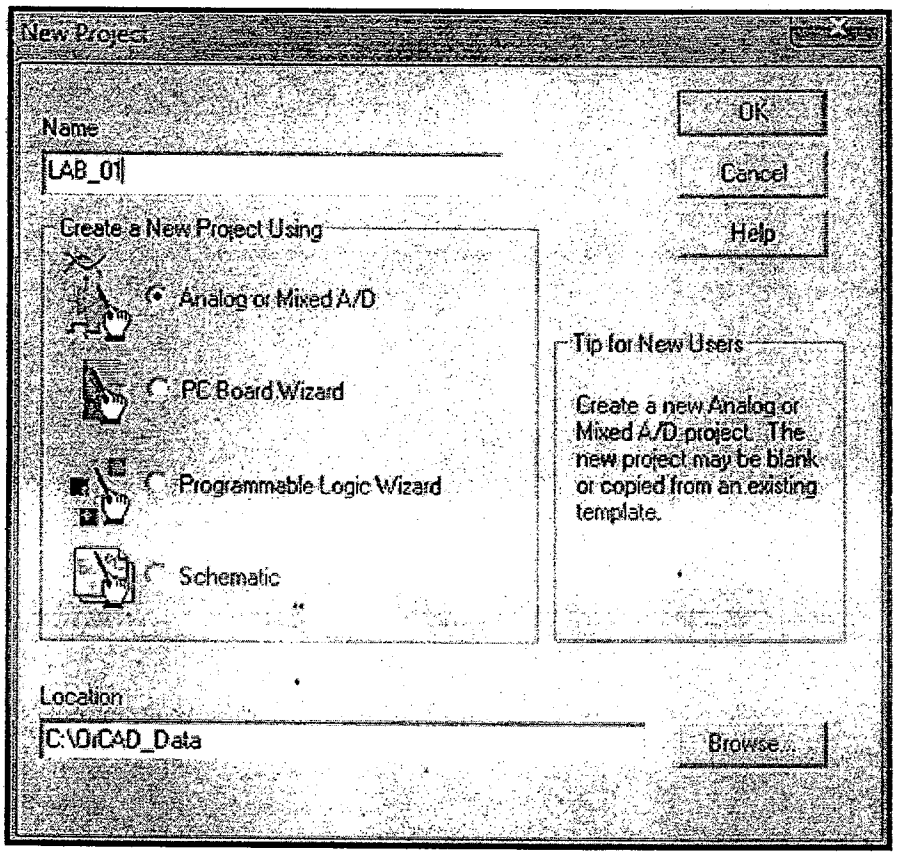
จากนั้นจะมีหน้าต่างปรากฏขึ้นมา ให้เลือกค่าตามรูปข้างล่าง



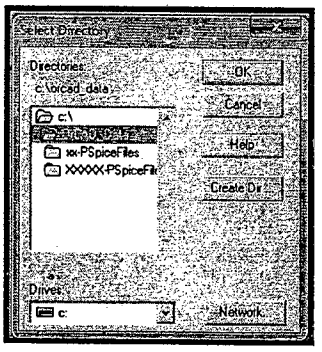
จากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง OrCAD Capture

ข) เลือก File->New->Project พร้อมกับตั้งชื่อ File เช่น LAB_01

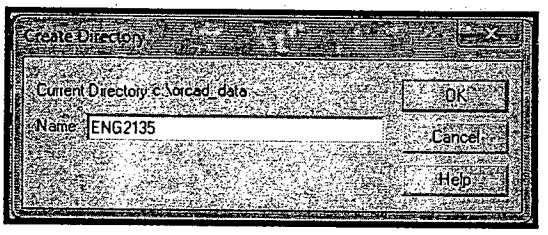
ค) คลิกเลือกช่อง Analog or Mixed A/D พร้อมกับเลือก Location เป็นไดร์ฟที่ต้องการบันทึกไฟล์

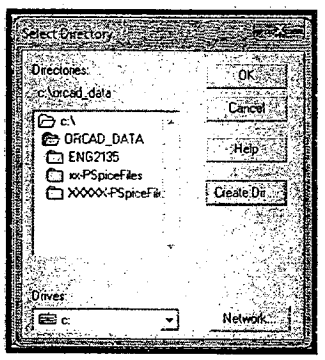


เลือก Browse ไปยังไดร์ฟที่ต้องการบันทึก



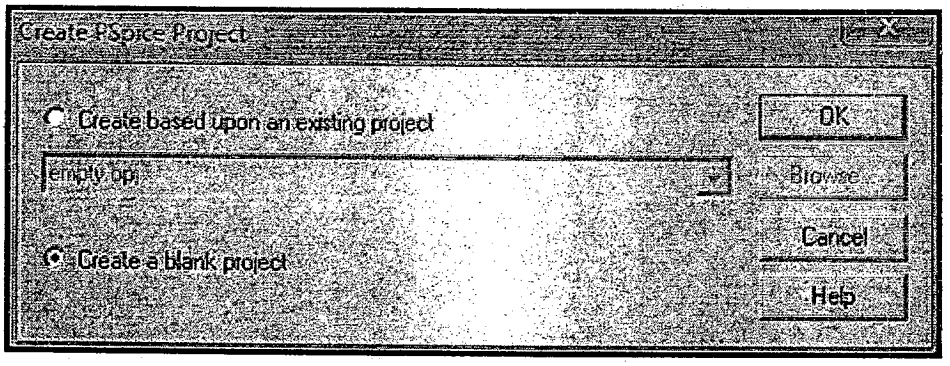
หรือถ้าต้องการสร้างไดเร็คทอรีใหม่ก็เลือก Create Dir... พิมพ์ชื่อไดเร็คทอรีที่ต้องการสร้าง เช่น ENG2135 จากนั้นกด OK



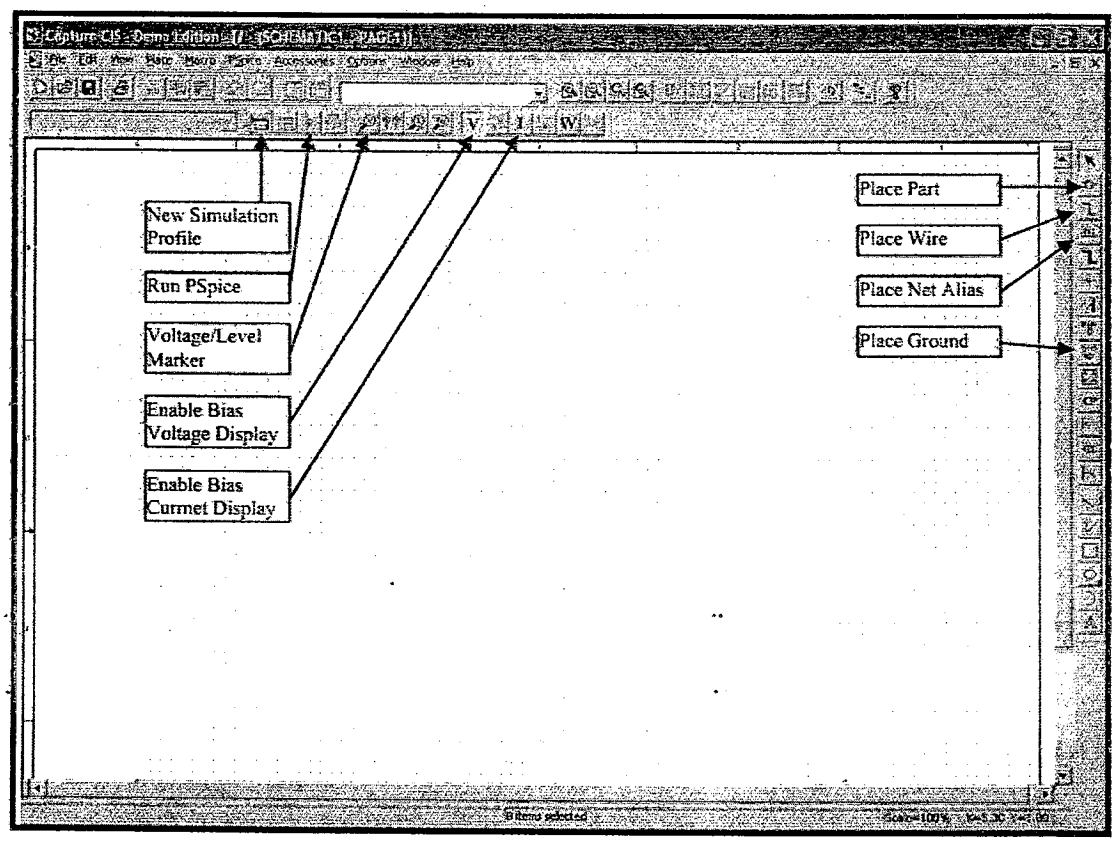


ดับเบิ้ลคลิ๊กที่ไดเร็กทอรี ENG2135 เพื่อเลือกไดเร็คทอรีที่ใช้งานที่เคยสร้างไว้ จากนั้นกดปุ่ม OK เพื่อกลับไปยังหน้าต่าง New Project จากนั้นเลือก OK เพื่อสร้าง New Project

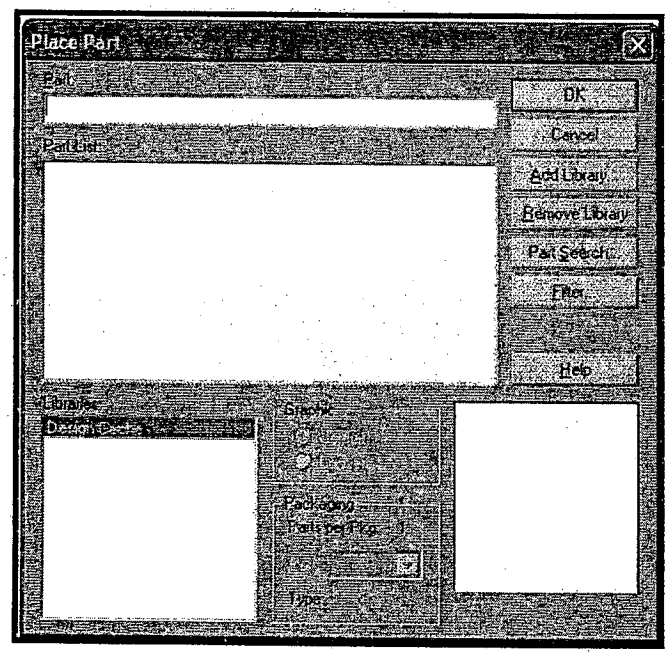
เลือก Create a blank project เพื่อเปิดหน้าต่างที่เป็น Schematic ที่ว่างเปล่า



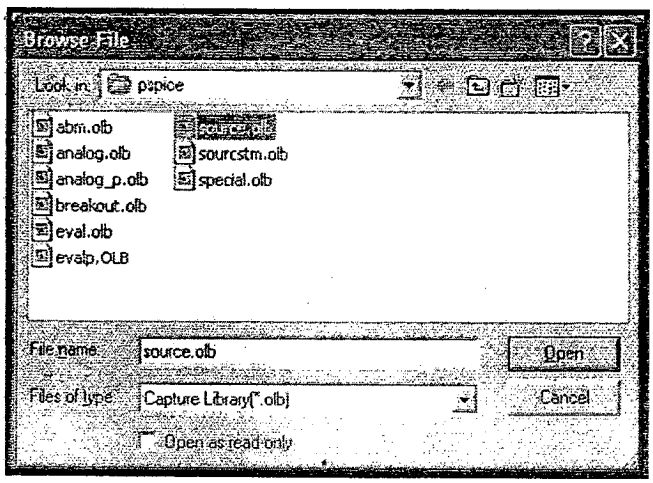
ตัวอย่างของหน้าต่าง Schematic ที่ว่างเปล่า



หลังจากที่หน้าต่าง Schematic ถูกเปิดขึ้นมา การวางอุปกรณ์ทำได้โดยเลือกกดปุ่มที่ 2 ทางด้านขวามือในแนวตั้งแล้ว จะปรากฏหน้าต่างใหม่ขึ้นมา



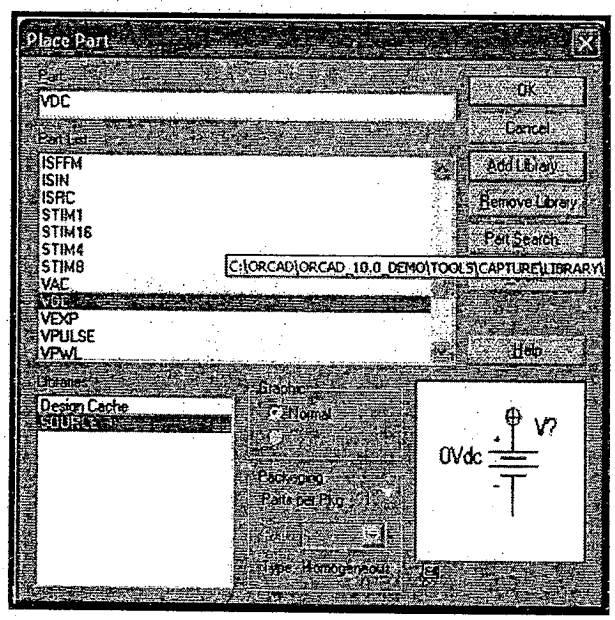
ง) กดปุ่ม Add Library เพื่อเพิ่มไลบรารี



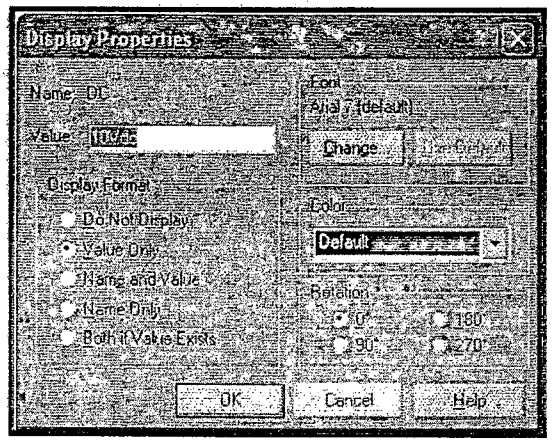
จ) เลือกุ High Light บรรทัด source.olb แล้วกดปุ่ม Open

ฉ) จากนั้นกดปุ่มที่ 2 ในแนวตั้งทางด้านขวามือเพื่อวางอุปกรณ์ เช่น ถ้าเป็นแหล่งจ่ายไฟตรง ให้เลือก High Light ที่มุมซ้ายด้านล่างของ Libraries เป็น SOURCE

ช) ส่วนช่อง Part ซึ่งอยู่มุมบนด้านขวามือให้พิมพ์ VDC ตามรูป โดยสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่พิมพ์ลงในหน้าต่างนี้จะปรากฏให้เห็นในมุมล่างด้านขวามือ ให้นักศึกษาตรวจสอบว่าตรงกับที่ต้องการเลือกใช้หรือไม่ ถ้าตรงก็กด OK ถ้าไม่ตรงให้ตรวจสอบใหม่ พร้อมทั้งแก้ไขให้ถูกต้อง

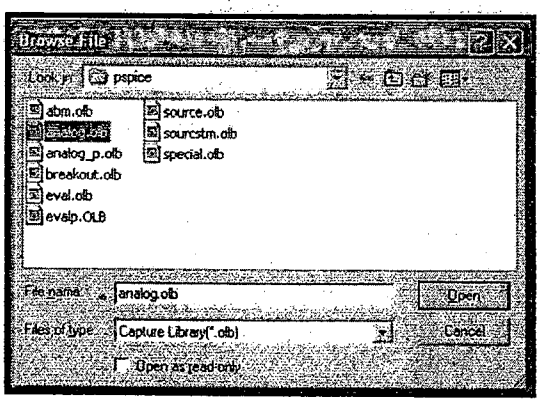


ช) จากนั้นวางอุปกรณ์ลงบน Blank Schematic การแก้ไขค่าแรงดัน VDC ทำได้ด้วยการดับเบิ้ลคลิกที่ค่าประจำตัวของอุปกรณ์เช่น จาก 0 โวลต์ เป็นค่า 10 โวลต์ หรือ ดับเบิ้ลคลิกที่ตัวอุปกรณ์ จะปรากฏหน้าต่างนี้ขึ้นมา พร้อมกับให้แก้ไขค่าในช่อง Value เช่น 10V นอกจากนี้ เรายังเลือกรูปแบบการแสดงค่า ขนาดและรูปแบบของตัวอักษร สีและลักษณะการวางอุปกรณ์ในหน้าต่างนี้ได้ด้วย

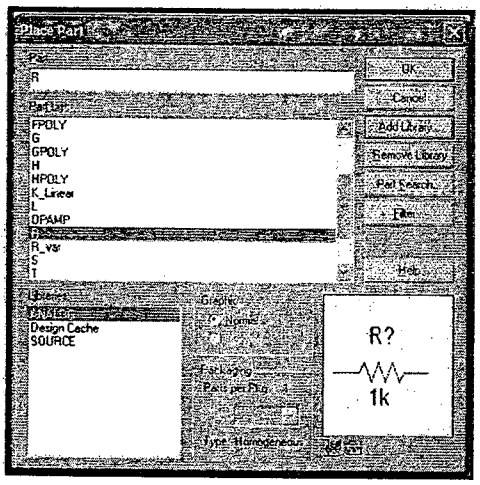


ฌ) จากนั้นกดปุ่ม ESC เพื่อเสร็จสิ้นการวางอุปกรณ์ (ยกเลิกคำสั่งทั้งหมด)

ญ) หากต้องการวางตัวต้านทานทำได้โดยเพิ่มไลบรารี analog.olb ด้วยการ Add Library พร้อมกับเลือก High Light บรรทัด analog.olb แล้วกดปุ่ม Open



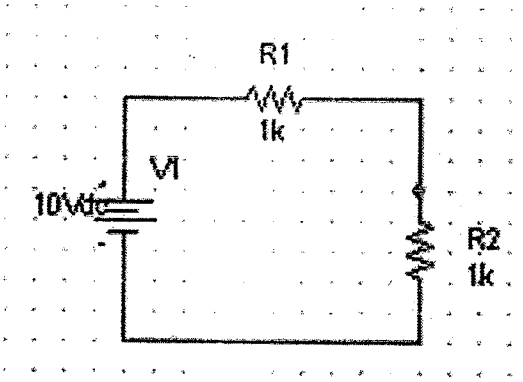
ฎ) เมื่อกดปุ่มที่ 2 ในแนวตั้งซึ่งอยู่ทางด้านขวามือ จะปรากฏหน้าต่างใหม่ขึ้นมา จากนั้นที่มุมล่างด้านซ้ายมือให้เลือก Libraries ที่ชื่อ ANALOG ส่วนมุมบนด้านซ้ายมือในช่อง Part ให้พิมพ์ R จะได้ดังรูป



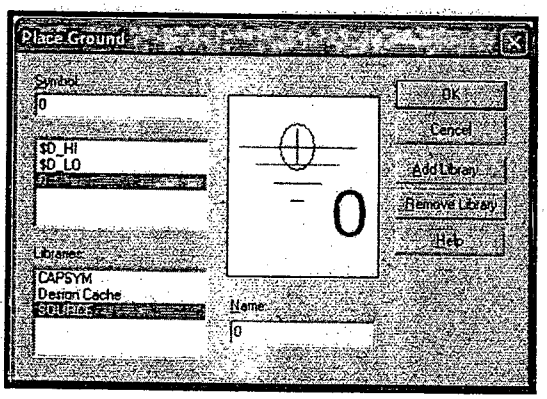
ฎ) จากนั้นกดปุ่ม OK

ฐ) ในการวางตัวต้านทานตัวที่ 2 ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกันกับขั้นตอนที่ผ่านมา หากต้องการปรับตัวต้านทานที่วางในแนวนอนให้เป็นการวางในแนวตั้ง สามารถทำได้โดยเลือกที่แถบเมนูด้านบนสุด จากนั้นเลือก Edit และเลือก Rotate ตามลำดับ

ฑ) จากนั้นวาดเส้นเชื่อมต่อวงจรโดยกดปุ่มที่ 3 ในแนวตั้งทางด้านขวามือ ลากเส้นเชื่อมต่อวงจรตามต้องการ ดังรูป

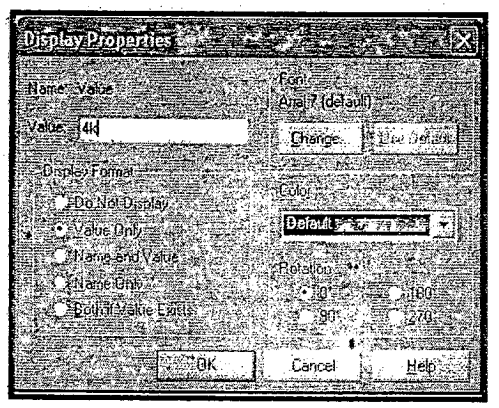


ฒ) การต่อกราวด์ให้กับวงจรทำได้ด้วยการกดปุ่มที่ 9 ในแนวตั้งทางขวามือ จะมีหน้าต่างปรากฏตามรูป



ฌ) ให้เลือกช่อง Libraries เป็น SOURCE ส่วนช่อง Symbol พิมพ์ 0 จากนั้นกดปุ่ม OK รำสัญลักษณ์กราวด์ที่ได้ไปต่อในตำแหน่งที่ต้องการ พร้อมกับลากเส้นโดยการกดปุ่มที่ 3 เพื่อเชื่อมต่อกราวด์เข้ากับวงจรให้ถูกต้อง

ด) ส่วนการปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานสามารถทำได้โดยการดับเบิ้ลคลิกที่ค่าของตัวต้านทานที่ต้องการเปลี่ยน เช่น การเปลี่ยนความต้านทานจาก 1k เป็น 4k จะเป็นดังรูป



3. ทฤษฎีพื้นฐานที่สำคัญ

3.1 ไดโอด

ไดโอดจัดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานที่สำคัญอย่างหนึ่งในวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากทั้งในอดีตและปัจจุบัน คุณสมบัติที่สำคัญของไดโอดคือความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ตกคร่อมตัวไดโอดและกระแสจะไม่เป็นเชิงเส้น

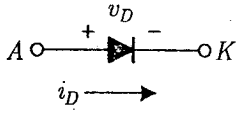
ไดโอดเป็นอุปกรณ์ประเภท 2 ขั้ว ประกอบขึ้นจากสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type) และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) ต่อเชื่อมเข้าหากัน เราเรียกไดโอดแบบนี้ว่า **"ไดโอดรอยต่อ (Junction Diode)"** แต่ในทางปฏิบัติ เราไม่สามารถเชื่อมต่อกันได้โดยตรงเพราะจะเกิดปัญหาหลายอย่างที่ไม่สามารถคาดคะเนพฤติกรรมที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติ บริเวณรอยต่อเราจะสร้างขึ้นโดยอาศัยการแพร่สารเจือหมู่ III ลงไปในสารเจือชนิดเอ็น หรือแพร่สารเจือหมู่ V ลงไปในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนใหญ่ (majority carrier) ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขณะที่สารกึ่งตัวนำชนิดพีมีโฮลเป็นพาหะส่วนใหญ่ ผลที่ได้คือ อิเล็คตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแพร่เข้าสู่บริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดพี แล้วไปรวมตัวกับโฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิดพีซึ่งอยู่อีกฝั่งหนึ่ง ในทางกลับกัน โฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ก็จะแพร่เข้าสู่บริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นทำให้เกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

การแพร่ที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ จนกระทั่งอนุภาคมีความหนาแน่นเสมอกันทั่วทุกบริเวณ แต่การแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลจะแตกต่างกัน กล่าวคือ ในช่วงแรกๆ จะเกิดการ

แพร่อย่างรวดเร็วมาก และการแพร่จะค่อยๆ ช้าลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น จนกระทั่ง ณ สภาวะสมดุล จะไม่เกิดการแพร่ (หรือเกิดขึ้นเพียงน้อยมาก) มีเพียงบริเวณรอยต่อเท่านั้นที่ไม่เกิดการแพร่ขึ้นเลย และเรียกบริเวณรอยต่อนี้ว่า บริเวณปลอดพาหะ (depletion region) มีเพียงประจุไฟฟ้าสถิตย์ที่เป็นอิออนบวกและอิออนลบเท่านั้น

ประจุไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นจะเป็นไปในลักษณะที่ต้านการเคลื่อนที่ของพาหะข้ามรอยต่อ (ประจุบวกสถิตในบริเวณปลอดพาหะฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะต้านไม่ให้โฮลในฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีข้ามรอยต่อมา รวมไปถึง ประจุลบสถิตย์ที่เกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะต้านไม่ให้อิเล็กตรอนอิสระในฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นข้ามรอยต่อมา เช่นกัน) แสดงว่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะเป็นตัวคอยป้องกันไม่ให้โฮลและอิเล็กตรอนอิสระข้ามรอยต่อไปมาได้อย่างสะดวกและเป็นตัวกำหนดศักย์ภายใน (built-in potential) มีค่าแปรตามความเข้มข้นของพาหะในสารกึ่งตัวนำ เมื่อนำไปใช้งานในวงจรไฟฟ้าจะต้องต่อขั้วไฟฟ้าออกมาข้างนอก โดยขั้วไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดพีเรียกว่า **ขั้วอาโนด** (Anode: A) อีกขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเรียกว่า **ขั้วคาโธด** (Cathode: K) สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของไดโอดแสดงได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 สัญลักษณ์ของไดโอดในวงจรไฟฟ้า

3.2 คุณสมบัติทางไฟตรง

เมื่อไดโอดรอยต่อได้รับแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกโดยให้ขั้วอาโนดมีแรงดันสูงกว่าขั้วคาโธด จะทำให้โฮลที่มีอยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะถูกดึงดูดโดยขั้วลบจากแรงดันไฟฟ้าจากภายนอก ในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ก็จะถูกดึงดูดโดยขั้วบวกไฟฟ้าจากแรงดันภายนอกเช่นกัน การเคลื่อนที่ของพาหะดังกล่าวจะทำให้บริเวณปลอดพาหะแคบลง ส่งผลให้การแพร่ของอิเล็กตรอนอิสระและโฮลข้ามรอยต่อได้มากขึ้น เราเรียกการไบอัสแบบนี้ว่า **“การไบอัสไปข้างหน้า (forward bias)”** หรือบางทีอาจเรียกว่า **“ไบอัสตรง”**

ในทางตรงข้าม หากให้ไดโอดรอยต่อได้รับแรงดันไฟฟ้าจากภายนอก โดยให้ขั้วอาโนดมีแรงดันต่ำกว่าขั้วคาโธดแล้ว จะทำให้โฮลที่มีอยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะถูกดึงดูดโดยขั้วลบจากแรงดันไฟฟ้าจากภายนอก ในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ก็จะถูกดึงดูดโดยขั้วบวกไฟฟ้าจากแรงดันภายนอกเช่นเดียวกับการไบอัสไปข้างหน้า แต่จะต่างตรงที่บริเวณ

ปลอดพาหะกว้างขึ้น เป็นผลให้การแพร่ของอิเล็กตรอนอิสระและโฮลข้ามรอยต่อได้ลดลง เราเรียกการไบอัสแบบนี้ว่า **"การไบอัสย้อนกลับ (reverse bias)"** หรือบางทีอาจเรียกว่า **"ไบอัสกลับ"**

เราอาจสรุปได้ว่า ไดโอดรอยต่อเมื่อถูกไบอัสไปข้างหน้าจะยอมให้กระแสไหลผ่านรอยต่อมาก ในทางกลับกัน หากให้ไดโอดรอยต่อได้รับไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสไหลผ่านไดโอดรอยต่อน้อยมากๆ

เรานำเอาไดโอดไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้ในวงจรเรียงกระแส (rectifier circuit) เพื่อทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟสลับให้เป็นแรงดันไฟตรง ใช้ในวงจรคงค่าแรงดัน (voltage regulator) และวงจรจำกัดแรงดัน (voltage limiting) เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีการนำเอาไดโอดไปใช้งานในวงจรทางแสงด้วย (optical circuit)

กระแสที่ไหลผ่านตัวไดโอดกับแรงดันที่ตกคร่อมไดโอด (ตามภาพที่ 1) มีความสัมพันธ์เป็นดังสมการ

$$i_D = I_S(e^{v_D/nV_T} - 1) \tag{1}$$

โดย I_S คือกระแสย้อนกลับอิ่มตัวของไดโอด (saturation current) สำหรับไดโอดรอยต่อซิลิกอนขนาดเล็กที่ใช้งานในวงจรกำลังต่ำจะมีค่าประมาณ 10^{-15} แอมแปร์ อีกทั้งมีค่าแปรตามอุณหภูมิ โดยทั่วไป I_S จะมีค่าเพิ่มขึ้นสองเท่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 5 องศาเซลเซียส ส่วนแรงดัน V_T คือ แรงดันอุณหภูมิ (thermal voltage) มีค่าตามสมการ

$$V_T = \frac{kT}{q} \tag{2}$$

เมื่อ k เป็นค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's constant) มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน

T แทนอุณหภูมิสัมบูรณ์ในหน่วยเคลวินมีค่าเท่ากับ $273 +$ อุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส

q แทนค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.60×10^{-19} คูลอมบ์

ณ อุณหภูมิห้องที่อยู่ในช่วงประมาณ 20 ถึง 30 องศาสเซลเซียส แรงดันอุณหภูมิมีค่าประมาณ 25 ถึง 26 มิลลิโวลต์ เรามักเลือกใช้ 25 มิลลิโวลต์ แต่ก็มีหนังสือบางเล่มเลือกค่าเท่ากับ 26 มิลลิโวลต์

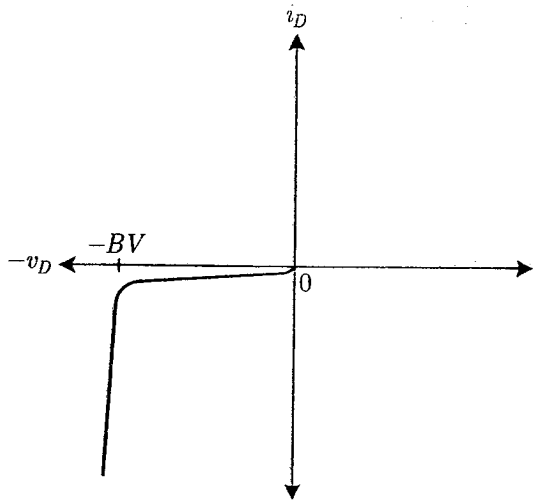
หมายเหตุ ไดโอดที่กล่าวถึงในที่นี้จะจำกัดเฉพาะไดโอดรอยต่อพี-เอ็น เท่านั้น

สมการที่ (1) นี้จะใช้อธิบายคุณสมบัติทางไฟตรงในอุดมคติของไดโอด เนื่องจากการพิสูจน์สมการนี้จะอาศัยการประมาณต่างๆ มากมาย อย่างไรก็ตาม ในเบื้องต้นและในการใช้งานไดโอดพื้นฐานส่วนใหญ่นั้น จะสามารถใช้สมการนี้อธิบายคุณสมบัติดังกล่าวได้โดยไม่มีข้อผิดพลาดมากนัด ตัวแปรสำคัญที่แสดงคุณสมบัติในหัวข้อนี้ของไดโอดที่ปรากฏในสมการคือค่ากระแสย้อนกลับอิ่มตัว I_S

ในการหาค่า I_S ของไดโอดจากการวัดนั้น เราจะไม่สามารถหาค่า I_S ได้จากการวัดกระแสในขณะที่ไดโอดได้รับการไบอัสย้อนกลับ (ที่มีค่าไม่มากกว่าหรือใกล้เคียงแรงดันเบรคดาวน์) เนื่องจากในความจริงแล้ว กระแสขณะที่ไดโอดได้รับการไบอัสดังกล่าวจะมีค่ามากกว่า I_S มาก เนื่องจากกระบวนการบางอย่าง ดังนั้นในทางปฏิบัติเราจะวัดค่า I_S นี้ได้ในขณะที่ไดโอดได้รับการไบอัสไปข้างหน้าเป็นหลัก

จุดสำคัญที่จะเน้นอีกประการหนึ่งเกี่ยวกับค่ากระแสของไดโอด คือการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของกระแสดังกล่าว โดยเราจะสรุปได้ว่ากระแส I_S จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิขณะที่ v_D มีค่าคงที่ (หรืออีกนัยหนึ่งก็คือไดโอดจะนำกระแสมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ขณะแรงดันไบอัสไดโอดคงที่) ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากการแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิอย่างมากของ I_S เป็นหลัก ถึงแม้ว่าในสมการ (1) จะได้แสดงการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในตัวแปร V_T ไว้แล้วก็ตาม

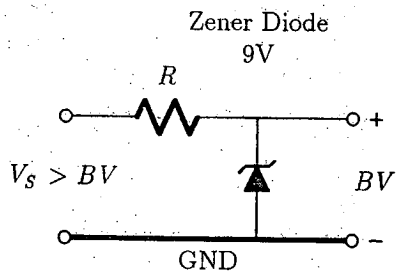
จากผลที่กล่าวข้างต้น เราสามารถสรุปคุณสมบัติสำคัญที่มีประโยชน์ของไดโอดได้ว่า "ไดโอดเป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำกระแสได้ทางเดียว (คือในขณะไดโอดได้รับไบอัสไปข้างหน้า) และปริมาณกระแสที่ไดโอดนำ ที่ศักดาค่าคงที่ใดๆ จะขึ้นอยู่กับค่ากระแสย้อนกลับอิ่มตัวของไดโอดนั้น" อย่างไรก็ตามยังมีคุณสมบัติทางไฟตรงของไดโอดที่มีความสำคัญและไม่สามารถใช้สมการที่ (1) มาอธิบายได้ ก็คือ คุณสมบัติที่เกิดจากปรากฏการณ์เบรกดาวน์ของไดโอดเมื่อได้รับการไบอัสย้อนกลับ โดยเราสามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ ด้วยกราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของไดโอดดังแสดงไว้ในภาพที่ 2 ซึ่งจะเห็นว่าปรากฏการณ์นีทำให้แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดมีค่าค่อนข้างคงที่ และไม่ขึ้นกับกระแสที่ไหลผ่านตัวไดโอดขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ เราเรียกแรงดันที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เบรกดาวน์นี้ว่า "**แรงดันเบรกดาวน์ของไดโอด** (Break down Voltage: BV)" โดยค่าของแรงดันนี้จะขึ้นกับไดโอดแต่ละชนิดแต่ละเบอร์



ภาพที่ 2 ปรากฏการณ์เบรกดาวน์ของไดโอด

นอกจากคุณสมบัติที่สรุปข้างต้น เรายังนำไดโอดมาใช้เป็นแรงดันอ้างอิงสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย แต่ในความเป็นจริงแล้ว แรงดันเบรกดาวน์ของไดโอดแบบธรรมดาทั่วไปจะมีค่าสูง (อาจจะมากกว่า 50 โวลต์) ดังนั้น ในการที่จะใช้งานไดโอดสำหรับงานดังกล่าว ผู้ผลิตจึงได้ออกแบบและสร้างไดโอดที่มีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำ และสามารถควบคุมค่าแรงดันนี้ได้โดยผู้ผลิต เราเรียกไดโอดที่ใช้งานเฉพาะงานนี้ว่า **"ซีเนอร์ไดโอด"** เช่น ซีเนอร์ไดโอดขนาด 9 โวลต์จะหมายถึงไดโอดที่ถูกออกแบบมาให้มีแรงดันเบรกดาวน์ประมาณ 9 โวลต์ หรือใช้งานเป็นแรงดันอ้างอิง 9 โวลต์ ดังแสดงในภาพที่ 3

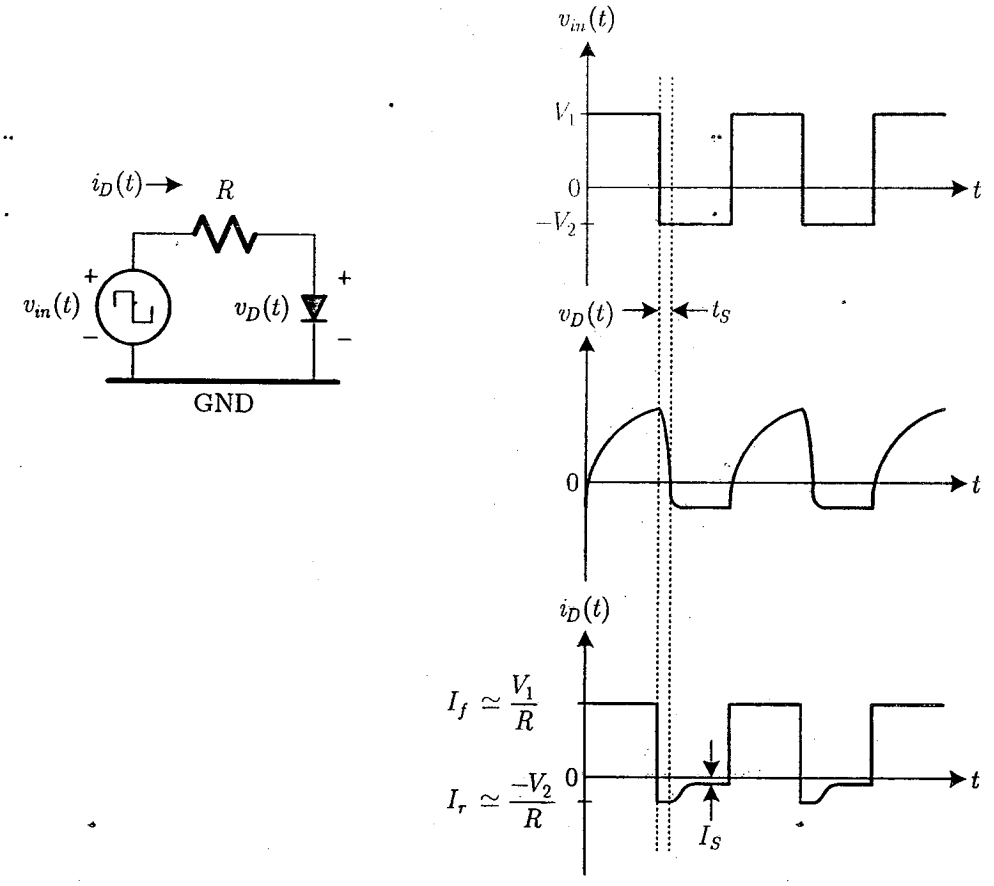
สรุปคือ ซีเนอร์ไดโอดจะถูกใช้งานในช่วงที่ได้รับการไบอัสย้อนกลับเป็นหลัก ดังนั้นคุณสมบัติในช่วงไบอัสไปข้างหน้าของซีเนอร์ไดโอดก็จะไม่มีความสำคัญ



ภาพที่ 3 สัญลักษณ์และตัวอย่างการใช้งานซีเนอร์ไดโอดเป็นแรงดันอ้างอิง 9 โวลต์

3.3 คุณสมบัติทางด้านการสวิทช์ของไดโอด

คุณสมบัติทางด้านสวิทช์ของไดโอด (หรือคุณสมบัติที่สภาวะชั่วขณะของไดโอด) การใช้งานไดโอดในงานที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสอย่างฉับพลัน เช่น งานด้านวงจรดิจิตอล เป็นต้น คุณสมบัติทางด้านสวิทช์ของไดโอดจะเข้ามามีบทบาทสำคัญ โดยปกติแล้ว เราคงจะต้องการให้การเปลี่ยนแปลงของช่วงการทำงานของไดโอด จากช่วงไบอัสไปข้างหน้าไปยังช่วงไบอัสย้อนกลับ หรือกลับกันเป็นไปอย่างรวดเร็ว แต่ในความเป็นจริงแล้ว การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสำหรับไดโอดสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 คุณสมบัติทางสวิทช์ของไดโอด

จากรูปจะเห็นได้ชัดเจนว่า ในการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจำเป็นต้องใช้เวลาค่าหนึ่ง ซึ่งก็คือเวลา t_s โดยเราจะเยกช่วงเวลานี้ว่า “เวลาหน่วงจากการสะสม (storage delay time)” ซึ่งสาเหตุหลักของการเกิดเวลาหน่วงดังกล่าวนี้ก็คือ ความเฉื่อยของประจุพาหะที่สะสมในตัวไดโอด ทั้งในบริเวณปลอดพาหะและบริเวณที่เป็นกลาง (คล้ายกับความเฉื่อยของประจุพาหะที่สะสมในตัวเก็บ

ประจุที่เราคุ้นเคย จึงทำให้เกิดแรงดนที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างทันทีทันใด)

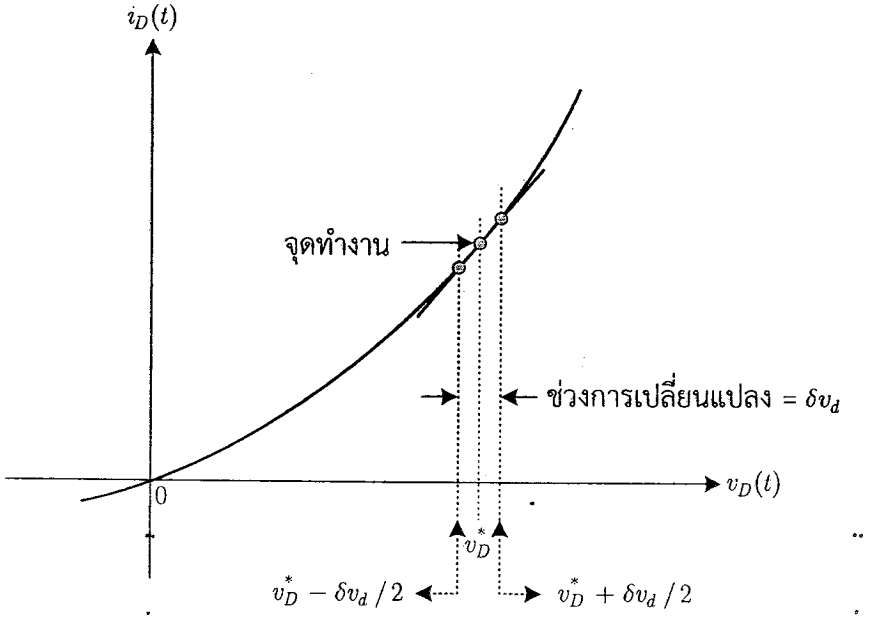
โดยปกติแล้ว เราสามารถลดเวลาหน่วงในการเปลี่ยนแปลงลงได้ โดยการควบคุมตัวแปรทางกายภาพของไดโอด เช่น การลดค่าเวลาชีวิต (life time) ของพาหะในสารกึ่งตัวนำ ที่ใช้ทำไดโอด โดยการโด๊บ (dope) ทอง ฯลฯ อย่างไรก็ตาม ไดโอดบางชนิดไม่ได้ถูกออกแบบให้ใช้กับงานการสวิทช์ เช่น ไดโอดเร็คติไฟร์ เป็นต้น จึงไม่จำเป็นต้องถูกออกแบบให้มีค่า t_s ต่ำ ดังนั้น ในการเลือกใช้งานไดโอดสำหรับวงจรที่เราออกแบบ จึงต้องคำนึงถึงลักษณะของงานเป็นสำคัญ จุดสำคัญที่จะเน้นในหัวข้อรี้ก็คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าเวลา t_s ที่ขึ้นอยู่กับค่ากระแส I_f และ I_r (ดูภาพที่ 4 ประกอบ) โดยเวลา t_s จะมีค่ามากขึ้นถ้ากระแส I_f มีค่ามากขึ้น (ขณะ I_r คงที่) และจะมีค่าน้อยลงเมื่อ I_r มีค่าเพิ่มขึ้น (ขณะ I_f คงที่) ซึ่งทำให้เราสรุปได้ว่า การกล่าวถึงค่า t_s นี้จะต้องกำหนดเงื่อนไขของกระแส I_f และ I_r ด้วย ซึ่งโดยปกติจะกำหนดเป็นอัตราส่วน I_r / I_f

3.4 คุณสมบัติทางสัญญาณระดับต่ำ

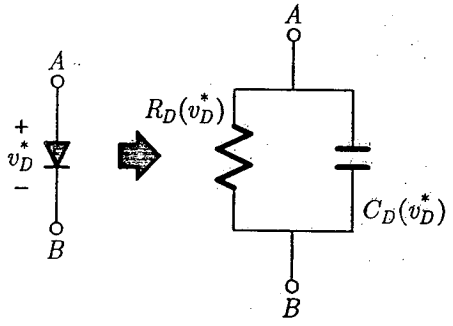
จากคุณสมบัติทั้งสองข้อที่กล่าวมาข้างต้นของไดโอด เราได้แสดงถึงคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของไดโอดเกี่ยวกับคุณสมบัติทางด้านสถิตย์ (กระแส, แรงดันไม่มีการเปลี่ยนแปลง) และคุณสมบัติทางด้านพลวัตร (กระแส, แรงดันมีการเปลี่ยนแปลง) ซึ่งจะเห็นได้ว่าพอเพียงกับการอธิบายคุณสมบัติพื้นฐานที่ใช้งานทั้งหมดของไดโอดแล้ว อย่างไรก็ตาม ขณะที่ไดโอดถูกใช้งานในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสจำกัดอยู่ในช่วงที่เล็กมากอยู่ช่วงหนึ่ง ดังเช่นที่แสดงในภาพที่ 5 นั้น เราจะสามารถแสดงคุณสมบัติทางพลวัตรของไดโอด โดยการจำลองไดโอดด้วยอุปกรณ์เชิงเส้นดังแสดงไว้ในภาพที่ 6 เพื่อประโยชน์ในการช่วยให้การคำนวณคุณสมบัติดังกล่าวทำได้ง่ายขึ้น เราเรียกแบบจำลองดังกล่าวนี้ว่า **"แบบจำลองที่สัญญาณระดับต่ำ (small-signal model)"** ของไดโอด แบบจำลองดังกล่าวประกอบด้วยการขนานกันของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุโดยความต้านทาน R_D มีค่าเท่ากับ

$$R_D = \frac{V_T}{I_S e^{-v_D^* / v_T}} \tag{3}$$

หรืออีกนัยหนึ่งก็คือส่วนกลับของความชันของสมการที่ (3) ที่แรงดันเท่ากับ v_D^* ส่วนค่าความเก็บประจุ C_D จะขึ้นอยู่กับตัวแปรทางกายภาพของไดโอด โดยปกติค่า C_D จะเกิดจากผลของพาหะที่สะสมในบริเวณปลอดพาหะและบริเวณที่เป็นกลางในตัวไอโอดเป็นหลัก มีค่าอยู่ในระดับพิโคฟารัด (เราจึงจะไม่กล่าวถึงในรายละเอียด)

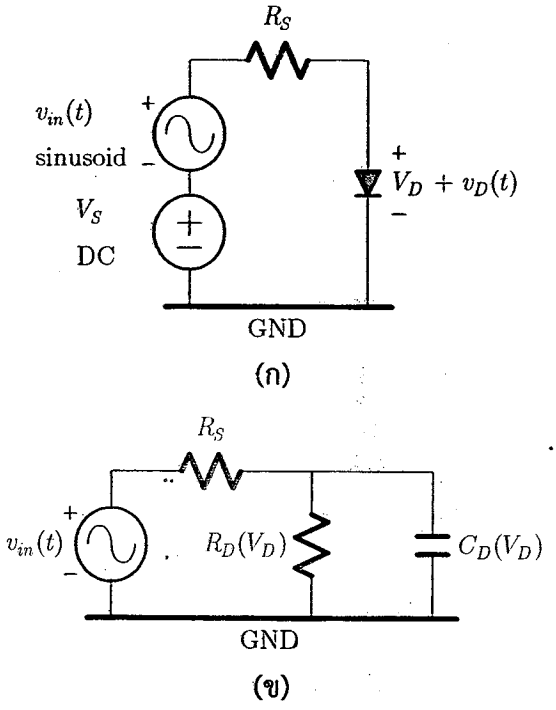


ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสของไดโอดที่จำกัดอยู่ในช่วงที่เล็กมากช่วงหนึ่ง



ภาพที่ 6 แบบจำลองที่สัญญาณระดับต่ำของไดโอด

จุดสำคัญที่จะเน้นให้นักศึกษาจดจำไว้เกี่ยวกับการใช้งานแบบจำลองดังกล่าวคือ แบบจำลองนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสของไดโอดมีค่าต่ำมากๆ และมีค่าขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่กำหนดจุดกลางของการเปลี่ยนแปลง (v_D^* และ i_D^* ในภาพที่ 5) หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า **"จุดทำงานของไดโอด"** อีกทั้งแบบจำลองดังกล่าวยังมีความสำคัญมากในการคำนวณคุณสมบัติทางไฟสลับที่สัญญาณระดับต่ำของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่นักศึกษาจะได้เรียนต่อไป ภาพที่ 7 แสดงตัวอย่างการใช้งานแบบจำลองของไดโอด โดยเราจะหาผลตอบสนองทางความถี่ของค่าอัตราขยายแรงดัน (v_{out} / v_{in}) โดยไดโอดถูกไบอัสไว้ให้มีจุดทำงานที่ V_D ด้วยแหล่งจ่าย V_S และ v_{in} เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ (sinusoidal signal) มีค่าแรงดันแบบยอดประมาณ 5 มิลลิโวลต์



ภาพที่ 7 ตัวอย่างวงจรที่ใช้แบบจำลองที่สัญญาณระดับต่ำของไดโอดเพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่ (ก) วงจรเริ่มต้น และ (ข) วงจรที่แสดงเฉพาะสัญญาณที่เปลี่ยนแปลง

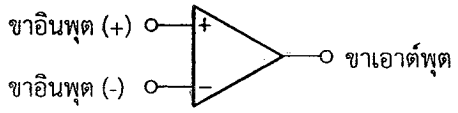
3.5 ออปแอมป์

วงจรขยายเชิงเนินการ (Operational amplifier) หรือเรียกสั้นๆว่า ออปแอมป์ (Op-AMP) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีใช้งานกันอย่างแพร่หลายและได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน เพราะใช้งานง่าย มีเสถียรภาพทางวงจรสูง โดยในช่วงแรกๆ ออปแอมป์ถูกสร้างขึ้นมาโดยใช้อุปกรณ์แบบดิสครีต (discrete component) เช่น หลอดสุญญากาศและทรานซิสเตอร์ เทคโนโลยีการผลิตสารกึ่งตัวนำได้มีการพัฒนาขึ้นเป็นลำดับ ออปแอมป์จึงถูกสร้างขึ้นในรูปวงจรรวม (Monolithic Op-AMP) นับตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา จึงมีออปแอมป์ให้เลือกใช้งานมากมายอีกทั้งมีราคาค่อนข้างถูก หาซื้อง่ายในปัจจุบัน

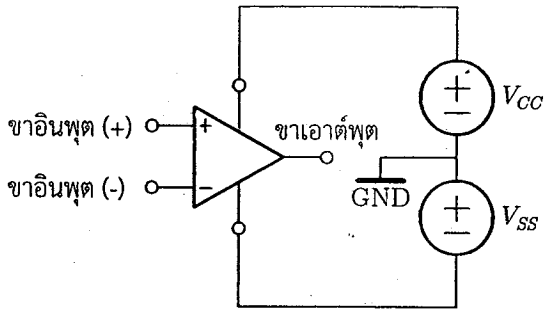
เราสามารถนำเอาออปแอมป์ไปใช้เป็นส่วนประกอบหลักในวงจรเชิงเส้น เช่น วงจรขยายผลต่างของสัญญาณ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการนำเอาออปแอมป์ไปใช้ในวงจรไม่เชิงเส้น เช่น วงจรเรียงกระแส (rectifier circuit) วงจรกำเนิดสัญญาณ (signal oscillator) วงจรปรับค่าขยายอัตโนมัติ (automatic gain control: AGC) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์ ในที่นี้จะขออธิบายเฉพาะการนำไปใช้ในวงจรที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น

ก) แบบจำลองของออปแอมป์

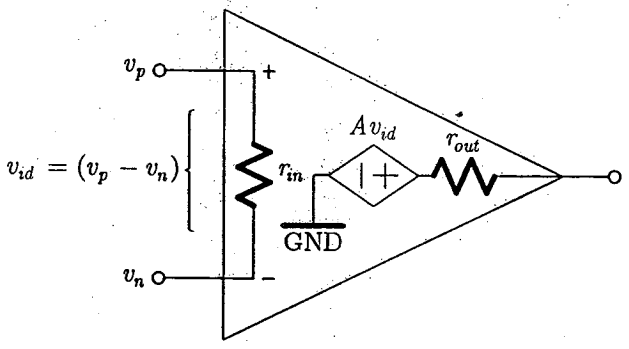
ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์ที่มีสามขั้ว กล่าวคือมีขั้วอินพุตขาบวก (non-inverting input terminal) ขั้วอินพุตขาลบ (inverting input terminal) และขั้วเอาต์พุต (output terminal) โครงสร้างภายในออปแอมป์ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์เป็นจำนวนมากซึ่งเป็นอุปกรณ์แอกทีฟ ดังนั้นเราจึงต้องจ่ายแรงดันไฟตรงให้กับออปแอมป์เพื่อให้ออปแอมป์ทำงาน



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 8 ออปแอมป์ (ก) สัญลักษณ์ทั่วไป (ข) การต่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และ (ค) แบบจำลองอย่างง่าย

ออปแอมป์ที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นดังภาพที่ 8 โดยภาพที่ 8(ก) แสดงสัญลักษณ์ที่ใช้ในวงจร มีการต่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นดังภาพที่ 8(ข) ขณะภาพที่ 8(ค) แสดงแบบจำลองอย่างง่ายของออปแอมป์ จากแบบจำลองจะเห็นว่าออปแอมป์เป็นวงจรขยายแรงดันที่ทำหน้าที่ขยายผลต่างแรงดันของสัญญาณอินพุต ในทางอุดมคติออปแอมป์ (ideal op-amp) มีคุณสมบัติเป็นดังนี้

- อัตราขยายลูปเปิด (open-loop gain: A) มีค่าสูงมากเป็นอนันต์
- ความต้านทานขาเข้า r_{in} มีค่าสูงมากเป็นอนันต์
- ความต้านทานขาออก r_{out} มีค่าต่ำมากเป็นศูนย์
- ออปแอมป์จะขยายเฉพาะความต่างแรงดันที่ขาอินพุตบวกและลบเท่านั้น นั่นแสดงว่าถ้าขาอินพุตบวกและลบมีค่าเท่ากันจะไม่เกิดการขยายแรงดันขึ้นที่เอาต์พุต
- กระแสที่ไหลเข้าขาอินพุตบวกและลบมีค่าน้อยมากจนเป็นศูนย์ เนื่องจากความต้านทานขาเข้ามีค่าเป็นอนันต์
- ความต้านทานขาออกที่มีค่าต่ำมากเป็นศูนย์นั้น จะไม่ส่งผลกระทบต่อแรงดันเอาต์พุตแต่อย่างใด
- ออปแอมป์สามารถจ่ายและรับกระแส (source and sink) ได้ไม่จำกัด
- กระแสที่ไหลออกจากขาเอาต์พุตมีค่าน้อยมากจนเป็นศูนย์

ข) ความไม่เป็นอุดมคติของออปแอมป์

ในทางปฏิบัติ ออปแอมป์มีคุณสมบัติที่ต่างจากอุดมคติหลายประการเช่น อัตราขยาย ความต้านทานขาเข้าและความต้านทานขาออก ระดับแรงดันเอาต์พุต แรงดันออฟเซททางอินพุต กระแสไบอัส แบนด์วิดท์ อัตราขยาย-แบนด์วิดท์ อัตราสลูว์และแบนด์วิดท์เต็มกำลัง มีรายละเอียดโดยคร่าวเป็นดังนี้

อัตราขยาย ความต้านทานขาเข้าและขาออก ในทางปฏิบัติ ออปแอมป์จะมีอัตราขยายและความต้านทานขาเข้าที่สูงมากแต่ไม่ถึงค่าอนันต์ ขณะเดียวกัน แม้ว่าความต้านทานขาออกจะมีค่าต่ำมาก แต่ก็ไม่ถึงศูนย์โอห์ม

ระดับแรงดันเอาต์พุต ในทางปฏิบัติ แม้ว่าอัตราขยายของออปแอมป์จะมีค่าสูง แต่เมื่อพิจารณาถึงระดับแรงดันเอาต์พุตที่ได้กลับพบว่ามีค่าไม่เกินแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้กับออปแอมป์ จึงทำให้กราฟถ่ายโอนแรงดันของออปแอมป์จะมีช่วงอิ่มตัว (saturation region) กล่าวคือ ในช่วงอิ่มตัวจะมีค่าอัตราขยายต่ำมา

แรงดันออฟเซททางอินพุต แม้ว่าจะทำให้แรงดันอินพุตขาบวกและแรงดันอินพุตขาลบมีค่าเท่ากันได้โดยอาศัยการป้อนกลับแบบลบ (negative feedback) ก็ตาม แต่เมื่อพิจารณาแรงดันเอาต์พุตที่ได้กลับมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ด้วยเหตุนี้ เราจึงต้องปรับให้แรงดันอินพุตขาบวกและขาลบมีค่าต่างกันเล็กน้อยจนทำให้แรงดันที่เอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์ เราเรียกแรงดันอินพุตที่ขาออปแอมป์ซึ่งมีค่าต่างจากเดิมนี้ว่า "***แรงดันออฟเซททางอินพุต***" อย่างไรก็ดี ค่าแรงดันออฟเซทนี้เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของออปแอมป์เบอร์นั้นๆ นอกจากนี้แล้ว ยังมีศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับ***แรงดันออฟเซททางเอาต์พุต***อีกด้วย ซึ่งจะเป็นการนิยามว่า เป็นแรงดันทางเอาต์พุตที่เกิดขึ้นจากการที่วงจรขยายออปแอมป์อินพุตเป็นศูนย์

กระแสไบอัสอินพุตและกระแสออฟเซท เป็นกระแสอินพุตของออปแอมป์ที่เกิดจากการมีกระแสไหลเข้าหรือไหลออกจากขาอินพุตทั้งสองของออปแอมป์ เราเรียกค่าเฉลี่ยเลขคณิตของกระแสอินพุตทั้งสองขานี้ว่า "**กระแสไบอัสอินพุต**" และเรียกค่าความแตกต่างของกระแสระหว่างขาอินพุตทั้งสองว่า "**กระแสออฟเซท**"

แบนด์วิดท์ โดยทั่วไป ออปแอมป์ในสภาวะปกติซึ่งไม่มีการป้อนกลับจะมีแบนด์วิดท์แคบมาก แต่หากมีการป้อนกลับแบบลบเกิดขึ้นแล้วจะมีแบนด์วิดท์กว้างขึ้นตามสมการความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$BW = BW_0\left(\frac{A}{K}\right) \tag{4}$$

เมื่อ BW แทนแบนด์วิดท์ของออปแอมป์ที่มีการป้อนกลับ

BW แทนแบนด์วิดท์ของออปแอมป์ที่ไม่มีการป้อนกลับ

A แทนอัตราขยายของออปแอมป์ และ

K แทนอัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณ

อัตราขยาย-แบนด์วิดท์ คือ ผลคูณของอัตราขยายไฟตรงกับแบนด์วิดท์ขณะไม่มีการป้อนกลับของออปแอมป์

$$GBW = A \times BW_0 \tag{5}$$

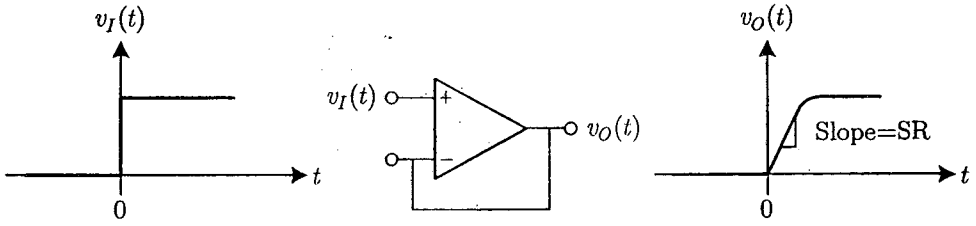
จากความสัมพันธ์ของสมการ อธิบายเพิ่มเติมได้ว่า หากต้องการอัตราขยายไฟตรงมีค่าสูงๆ แล้วผลที่ตามมาก็คือแบนด์วิดท์ของออปแอมป์จะลดลง นั่นเอง

อัตราสลูว์และแบนด์วิดท์เต็มกำลัง โดยอัตราสลูว์จะเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตสูงสุดของออปแอมป์ มีค่าเป็นดังนี้

$$SR = \left.\frac{dv_{out}}{dt}\right|_{\max} \tag{6}$$

อัตราสลูว์สามารถวัดได้โดยการป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดขนาดใหญ่ให้กับวงจรขยายสัญญาณแบบบั๊ปเฟอร์ (buffer amplifier) ส่วน**แบนด์วิดท์เต็มกำลัง** (full-power bandwidth: ω_m) เป็นแบนด์วิดท์ที่ทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุตสวิงได้สูงสุดโดยไม่เกิดความผิดเพี้ยนขึ้นเลย ความถี่ของสัญญาณ ω จะต้องมีค่าเท่ากับ

$$\omega \le \omega_m = \frac{SR}{\left|V_{out}\right|_{\max}} \tag{7}$$



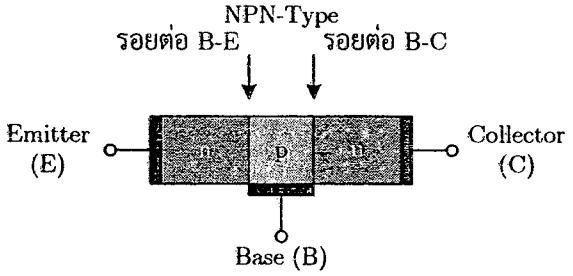
ภาพที่ 9 การวัดอัตราสลูว์ของออปแอมป์โดยอาศัยการป้อนสัญญาณแบบขั้นบันได

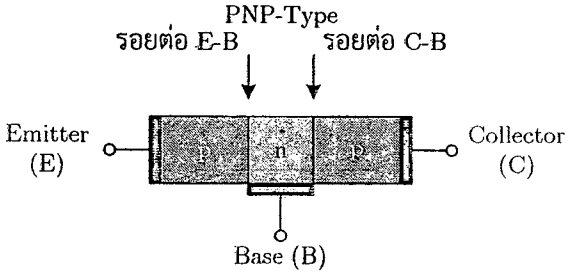
ค) การนำไปใช้งาน

การนำเอาออปแอมป์ไปใช้งานนั้น ส่วนใหญ่จะใช้เป็นวงจรประมวลผลสัญญาณเชิงเส้น เช่น วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (inverting amplifier) วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (non-inverting amplifier) วงจรรวมแรงดันสัญญาณ (summing amplifier) วงจรขยายแรงดันผลต่าง (difference amplifier) และวงจรขยายเครื่องมือวัด (instrumentation amplifier) เป็นต้น

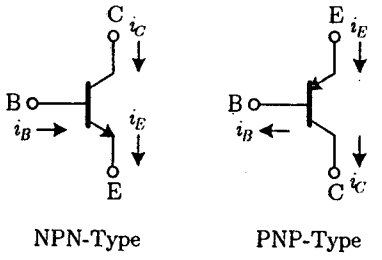
นอกจากนี้แล้ว เรายังใช้ออปแอมป์ในวงจรแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วย เช่น วงจรเร็คติไฟเออร์ (rectifier circuit) วงจรปรับอัตราขยายสัญญาณอัตโนมัติ (automatic gain control: AGC) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์ (schmit-trigger circuit) วงจรกำเนิดสัญญาณรูปเหลี่ยม (oscillator circuit) เป็นต้น

พื้นที่สารกึ่งตัวนำสามส่วนคือ อิมิตเตอร์ (emitter: E) เบส (base: B) และคอลเลกเตอร์ (collector: C)





(ก)



(ข)

ภาพที่ 10 ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN และ PNP **(ก)** โครงสร้างทางกายภาพ และ **(ข)** สัญลักษณ์เชิงวงจร

กรณีทรานซิสเตอร์ชนิด NPN มีขาอิมิตเตอร์และขาคอลเลกเตอร์ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ประกบเข้าด้านซ้ายและขวามือโดยมีขาเบสซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีอยู่ตรงกลาง

กรณีทรานซิสเตอร์ชนิด PNP มีขาอิมิตเตอร์และขาคอลเลกเตอร์ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ประกบเข้าด้านซ้ายและขวามือโดยมีขาเบสซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นอยู่ตรงกลาง

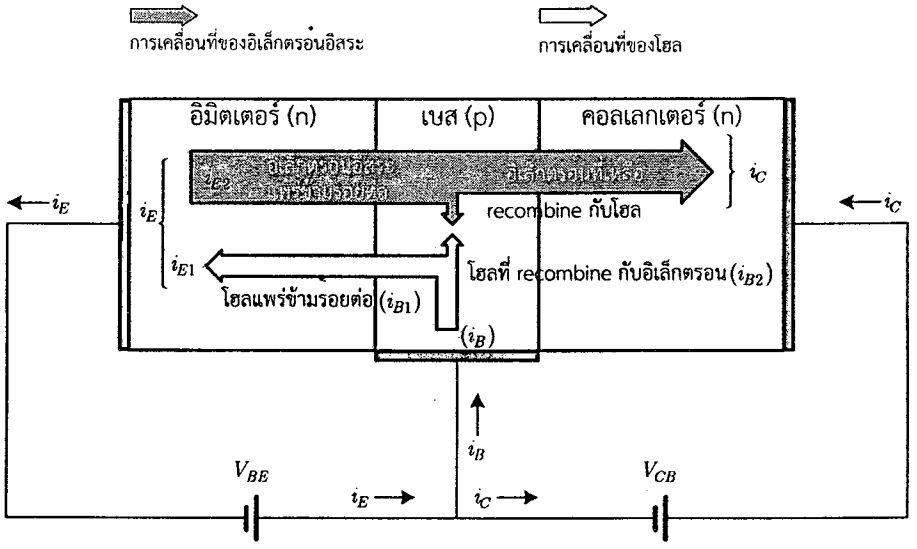
ทั้งทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP นั้นมีการทำงานแบ่งออกเป็น 3 สถานะ กล่าวคือ สถานะคัตออฟ (cut-off) สถานะแอกทีฟ (active) และสถานะอิ่มตัว (saturation) แต่ละสถานะใช้การพิจารณาจากลักษณะการไบอัสแบบไปข้างหน้า (forward bias) และย้อนกลับ (reverse bias) ดังนี้

สถานะ	BEJ	BCJ
สถานะคัตออฟ	ย้อนกลับ	ย้อนกลับ
สถานะแอกทีฟ	ไปข้างหน้า	ย้อนกลับ
สถานะอิ่มตัว	ไปข้างหน้า	ไปข้างหน้า

ก) การทำงานทางกายภาพ

กรณีทรานซิสเตอร์ชนิด NPN

สถานะคัตออฟ (cut-off) ถ้ารอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ และเบส-คอลเลกเตอร์ได้รับไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) จะไม่มีกระแสไหลผ่านรอยต่อทั้งสองเลย (ไหลน้อยมาก) นั่นคือ $i_B = i_C = i_E = 0$ จะเห็นได้ว่าในสถานะเช่นนี้ขาคอลเลกเตอร์จะถูกตัดขาดออกจากขาอิมิตเตอร์โดยสิ้นเชิง



ภาพที่ 11 การไบอัสในสถานะแอกทีฟไปข้างหน้าสำหรับทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN

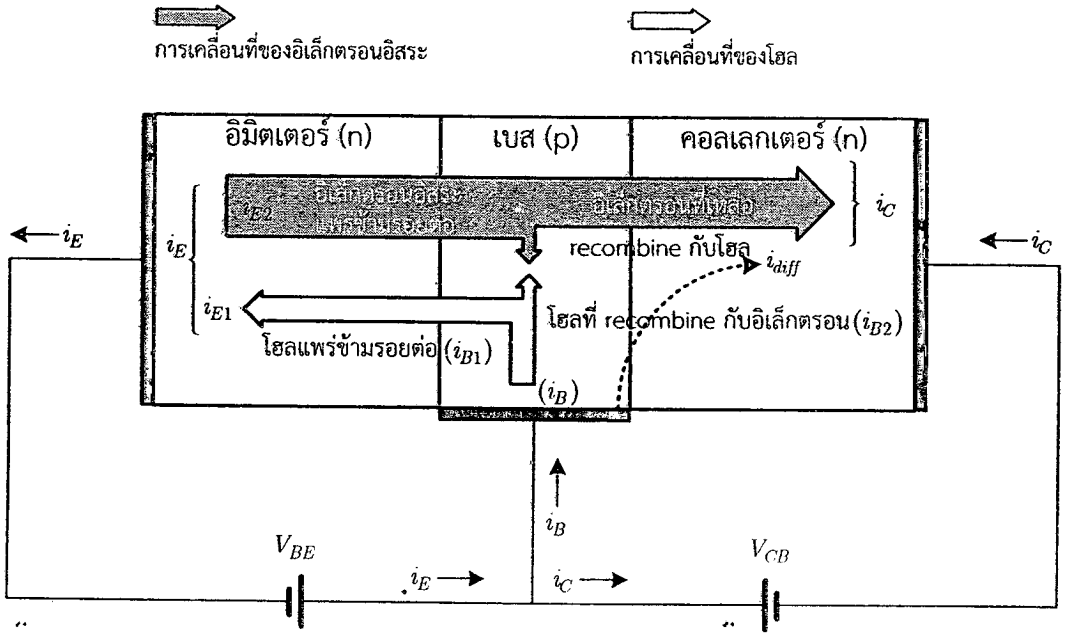
สถานะแอกทีฟ (active) กรณีของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์จะทำงานได้ถ้าให้รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ ได้รับไบอัสไปข้างหน้า ส่วนรอยต่อเบส-คอลเลกเตอร์จะต้องได้รับไบอัสย้อนกลับ

จากภาพที่ 11 จะเห็นได้ว่า กระแส i_E ประกอบด้วยกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดจากการแพร่ของอิเล็กตรอนจากอิมิตเตอร์ไปยังเบส และกระแสโฮลที่เกิดจากการแพร่ของโฮลจากเบสไปยังอิมิตเตอร์ โดยทั่วไป ทรานซิสเตอร์ได้ถูกออกแบบให้กระแสอิเล็กตรอนมีขนาดใหญ่กว่ากระแสโฮลมาก ซึ่งสามารถทำได้โดยการแพร่ให้สารเจือในอิมิตเตอร์มีความหนาแน่นสูงกว่าสารเจือในเบสมาก ส่งผลให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในอิมิตเตอร์มีค่าสูงกว่าความหนาแน่นของโฮลในเบสมาก เช่นกัน

อิเล็กตรอนที่เกิดการแพร่จากอิมิตเตอร์เข้าสู่เบสนี้จะกลายเป็นพาหะส่วนน้อย (minority carriers) ในเบส [ขณะที่พาหะส่วนใหญ่ (majority carriers) เป็นโฮล] อิเล็กตรอนเหล่านี้บางส่วนจะรวมตัว (recombination) กับโฮลในเบส แต่เนื่องจากรอยต่อที่เบส-คอลเลกเตอร์ได้รับไบอัสย้อนกลับ ทำให้สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อจะดึงอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเข้ามาให้เลื่อนไปยังบริเวณคอลเลกเตอร์ และเคลื่อนที่ออกจากทรานซิสเตอร์ไปสู่วงจรภายนอก การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังกล่าวจะทำให้เกิดกระแสอิเล็กตรอนวิ่งเข้าสู่ขาคอลเลกเตอร์ โดยเราจะเรียกกระแสดังกล่าวว่า กระแสคอลเลกเตอร์ (collector current: i_C) ทั้งนี้ เนื่องจากทรานซิสเตอร์โดยทั่วไปจะมีบริเวณที่เบสแคบ อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามเบสเข้าไปสู่คอลเลกเตอร์ได้

พิจารณาภาพที่ 11 อีกครั้ง จะเห็นได้ว่า กระแสที่ไหลเข้าสู่ขาเบส ซึ่งเราเรียกว่า กระแสเบส (base current: i_B) จะประกอบด้วยกระแสสองส่วน กล่าวคือ กระแสเบสส่วนแรก (i_{B1}) เกิดจากกระแสโฮลที่แพร่ผ่านรอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ($i_{B1} = i_{E1}$) และกระแสเบสส่วนที่สอง (i_{B2}) นั้นเกิดจากการรวมตัวของโฮลและอิเล็กตรอนในบริเวณเบส ทั้งนี้ เนื่องจากในสถานะสมดุลจะมีอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่เข้ามาสู่บริเวณเบสในอัตราคงที่และอิเล็กตรอนเหล่านี้จะเกิดการรวมตัวกับโฮลที่เบส ดังนั้น เพื่อให้จำนวนโฮลในบริเวณเบสมีค่าคงที่ในสถานะสมดุล จึงต้องมีโฮลเคลื่อนที่เข้ามาที่บริเวณเบสด้วยอัตราคงที่ การเคลื่อนที่ของโฮลดังกล่าวจะทำให้เกิดการกระแส i_{B2} ไหลขึ้น โดยทั่วไปแล้ว เราต้องการให้กระแส i_B มีค่าน้อยๆ ซึ่งสามารถทำได้โดยแบ่งออกเป็นสองกรณี กล่าวคือ ทำให้เกิดการแพร่สารเจือบริเวณเบสอย่างเบาบางจะทำให้ i_{B1} มีค่าน้อยๆ ได้ หรือการสร้างทรานซิสเตอร์ที่มีบริเวณเบสแคบๆ จะทำให้เกิดการรวมตัวของกระแสที่เบสน้อยลง นั่นคือจะได้ i_{B2} มีค่าน้อยๆ ด้วย

สถานะอิ่มตัว (saturation) ถ้ารอยต่ออิมิตเตอร์-เบส และคอลเลกเตอร์-เบสได้รับไบอัสตรง (forward bias) ดังภาพที่ 12 จะเกิดการแพร่ของพาหะส่วนใหญ่ข้ามรอยต่อคอลเลกเตอร์-เบส จะทำให้มีกระแสไหลจากเบสไปยังคอลเลกเตอร์ได้ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า กระแสดังกล่าวจะไหลไปในทางเดียวกับกระแสเบส i_B แต่จะมีทิศสวนทางกับกระแส i_C หากเทียบกับในสถานะแอกทีฟจะพบว่า กระแสเบส i_B ในสถานะอิ่มตัวนี้มีค่าสูงขึ้นกว่าในสถานะแอกทีฟ ขณะที่กระแสคอลเล็กเตอร์ i_C จะลดลง ในที่สุดในสถานะอิ่มตัวนี้จะมีอัตราขยายกระแส β ลดลง



ภาพที่ 12 การไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN ในสถานะอิ่มตัวอย่างอ่อน

นอกจากนี้ ถ้าเราให้แรงดันที่เบส-คอลเลกเตอร์ V_{BC} มีค่าสูงมากพอ จะทำให้กระแสคอลเลกเตอร์ i_C มีค่าตกลงจนเป็นศูนย์ เนื่องจากกระแสที่เกิดจากการเลื่อนของอิเล็กตรอนจากเบสไปสู่คอลเลกเตอร์นั้นจะถูกหักล้างด้วยกระแสที่เกิดจากการแพร่ของอิเล็กตรอนจากคอลเลกเตอร์สู่เบส และเมื่อแรงดันที่เบส-คอลเลกเตอร์ V_{BC} มีค่าสูงขึ้นไปอีก กระแสคอลเลกเตอร์ i_C จะเริ่มไหลย้อนกลับ

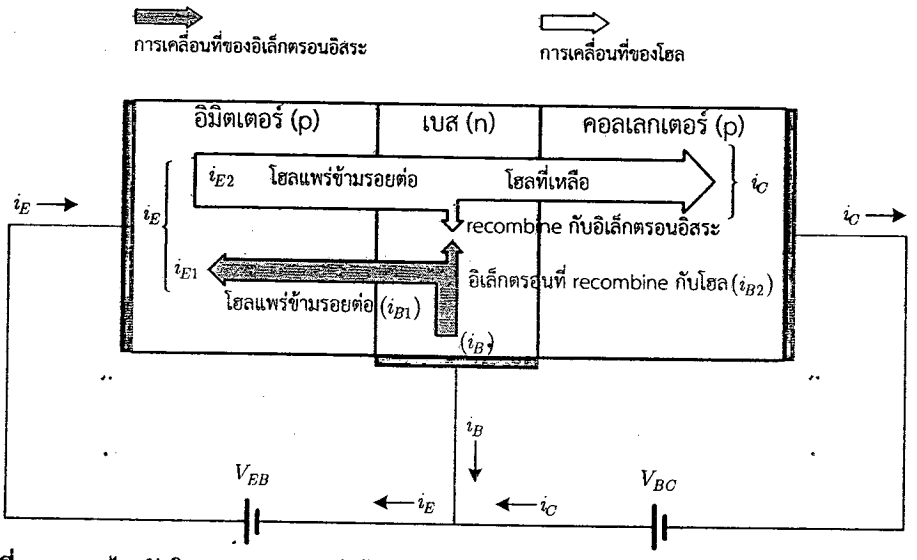
กรณีทรานซิสเตอร์ชนิด PNP

สถานะ	EBJ	CBJ
สถานะคัตออฟ	ย้อนกลับ	ย้อนกลับ
สถานะแอกทีฟ	ไปข้างหน้า	ย้อนกลับ
สถานะอิ่มตัว	ไปข้างหน้า	ไปข้างหน้า

สถานะคัตออฟ (cut-off) ถ้ารอยต่ออิมิตเตอร์-เบส และคอลเลกเตอร์-เบสได้รับไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) จะไม่มีกระแสไหลผ่านรอยต่อทั้งสองเลย (ไหลน้อยมาก) นั่นคือ $i_B = i_C = i_E = 0$ จะเห็นได้ว่าในสถานะเช่นนี้ขาคอลเลกเตอร์จะถูกตัดขาดออกจากขาอิมิตเตอร์โดยสิ้นเชิง

สถานะแอกทีฟ (active) กรณีของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์จะทำงานได้ถ้าให้รอยต่ออิมิตเตอร์-เบส ได้รับไบอัสไปข้างหน้า (มีกระแสไหลจากอิมิตเตอร์ไปยังเบส) ส่วนรอยต่อคอลเลกเตอร์-เบส จะต้องได้รับไบอัสย้อนกลับ

สถานะแอกทีฟ (active) กรณีของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์จะทำงานได้ถ้าให้รอยต่ออิมิตเตอร์-เบส ได้รับไบอัสไปข้างหน้า (มีกระแสไหลจากอิมิตเตอร์ไปยังเบส) ส่วนรอยต่อคอลเลกเตอร์-เบส จะต้องได้รับไบอัสย้อนกลับ



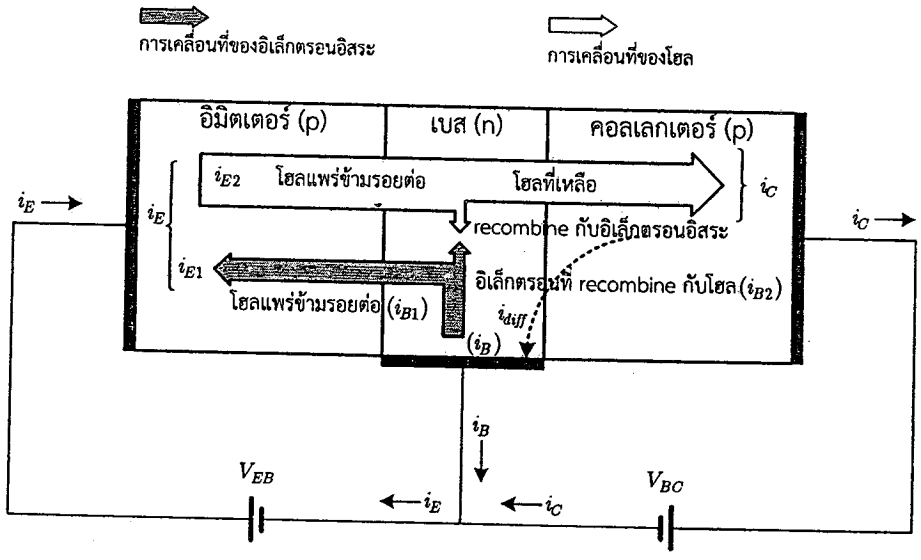
ภาพที่ 13 การไบอัสในสถานะแอกทีฟไปข้างหน้าสำหรับทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด PNP

จากภาพที่ 13 จะเห็นได้ว่า กระแส i_E ประกอบด้วยกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดจากการแพร่ของอิเล็กตรอนจากเบสไปยังอิมิตเตอร์ (i_{E1}) และกระแสโฮลที่เกิดจากการแพร่ของโฮลจากอิมิตเตอร์ไปยังเบส (i_{E2}) โดยทั่วไป ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ได้ถูกออกแบบให้กระแสโฮลมีขนาดใหญ่กว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก ($i_{E2} \gg i_{E1}$) ซึ่งสามารถทำได้โดยการแพร่ให้สารเจือในอิมิตเตอร์มีความหนาแน่นสูงกว่าสารเจือในเบสมาก ส่งผลให้ความหนาแน่นของโฮลในอิมิตเตอร์มีค่าสูงกว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในเบสมาก เช่นกัน

โฮลที่เกิดการแพร่จากอิมิตเตอร์เข้าสู่เบสนี้จะกลายเป็นพาหะส่วนน้อย (minority carriers) ในเบส [ขณะที่พาหะส่วนใหญ่ (majority carriers) เป็นอิเล็กตรอน] โฮลเหล่านี้บางส่วนจะรวมตัว (recombination) กับอิเล็กตรอนอิสระในเบส แต่เนื่องจากรอยต่อที่คอลเลกเตอร์-เบส ได้รับไบอัสย้อนกลับ ทำให้สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อจะดึงโฮลที่ถูกฉีดเข้ามาให้เลื่อนไปยังบริเวณคอลเลกเตอร์ และเคลื่อนที่ออกจากทรานซิสเตอร์ไปสู่วงจรภายนอก การเคลื่อนที่ของโฮลดังกล่าวจะทำให้เกิดกระแสโฮลวิ่งเข้าสู่ขาคอลเลกเตอร์ โดยเราจะเรียกกระแสดังกล่าวว่า กระแสคอลเลกเตอร์ (collector current: i_C) ทั้งนี้ เนื่องจากทรานซิสเตอร์โดยทั่วไปจะมีบริเวณที่เบสแคบ โฮลส่วนใหญ่จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามเบสเข้าไปสู่คอลเลกเตอร์ได้

พิจารณาภาพที่ 13 อีกครั้ง จะเห็นได้ว่า กระแสที่ไหลออกจากขาเบส ซึ่งเราเรียกว่า กระแสเบส (base current: i_B) จะประกอบด้วยกระแสสองส่วน กล่าวคือ กระแสเบสส่วนแรก (i_{B1}) เกิดจากกระแสโฮลที่แพร่ผ่านรอยต่ออิมิตเตอร์-เบส ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ($i_{B1} = i_{E1}$) และกระแสเบสส่วนที่สอง (i_{B2}) นั้นเกิดจากการรวมตัวของโฮลและอิเล็กตรอนในบริเวณเบส ทั้งนี้เนื่องจากในสถานะสมดุลจะมีโฮลแพร่เข้ามาสู่บริเวณเบสในอัตราคงที่และโฮลเหล่านี้จะเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนอิสระที่เบส ดังนั้น เพื่อให้จำนวนอิเล็กตรอนอิสระในบริเวณเบสมีค่าคงที่ในสถานะสมดุล จึงต้องมีอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่เข้ามาที่บริเวณเบสด้วยอัตราคงที่ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระดังกล่าวจะทำให้เกิดการกระแส i_{B2} ไหลขึ้น โดยทั่วไปแล้ว เราต้องการให้กระแส i_B มีค่าน้อยๆ ซึ่งสามารถทำได้โดยแบ่งออกเป็นสองกรณี กล่าวคือ ทำให้เกิดการแพร่สารเจือบริเวณเบสอย่างเบาบางจะทำให้ i_{B1} มีค่าน้อยๆ ได้ หรือการสร้างทรานซิสเตอร์ที่มีบริเวณเบสแคบๆ จะทำให้เกิดการรวมตัวของกระแสที่เบสน้อยลง นั่นคือจะได้ i_{B2} มีค่าน้อยๆ ด้วย

สถานะอิ่มตัว (saturation) ถ้ารอยต่ออิมิตเตอร์-เบส และคอลเลกเตอร์-เบสได้รับไบอัสตรง (forward bias) ดังภาพที่ 13 จะเกิดการแพร่ของพาหะส่วนใหญ่ข้ามรอยต่อคอลเลกเตอร์-เบส จะทำให้มีกระแสไหลจากคอลเลกเตอร์ไปยังเบสได้ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า กระแสดังกล่าวจะไหลไปในทางเดียวกับกระแสเบส i_B แต่จะมีทิศสวนทางกับกระแส i_C (ดังภาพที่ 14) หากเทียบกับในสถานะแอกทีฟจะพบว่า กระแสเบส i_B ในสถานะอิ่มตัวนี้มีค่าสูงขึ้นกว่าในสถานะแอกทีฟ ขณะที่กระแสคอลเล็กเตอร์ i_C จะลดลง ในที่สุดในสถานะอิ่มตัวนี้จะมีอัตราขยายกระแส β ลดลง

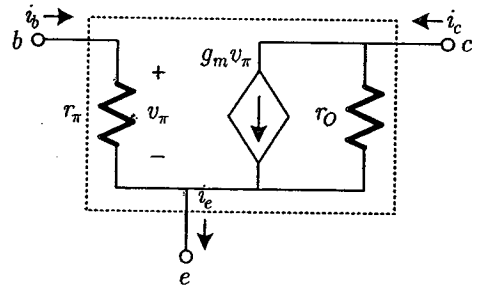


ภาพที่ 14 การไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด PNP ในสถานะอิ่มตัวอย่างอ่อน

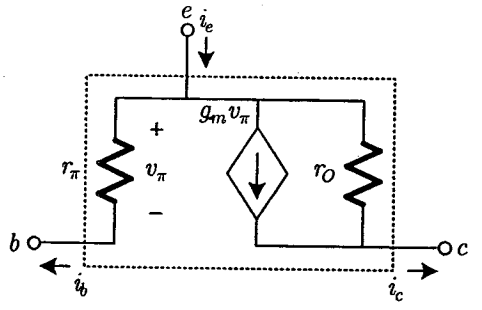
ข) แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก

ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN และ PNP มีแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal model) เป็นดังภาพที่ 15 โดยภาพที่ 15(ก) และ (ข) เป็นแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP ตามลำดับโดยมีความต้านทานที่เชื่อต่อระหว่างขาเบสและคอลเลกเตอร์แทนค่าด้วย $r_\pi = V_T / I_B = \beta V_T / I_C$ มีแรงดันตกคร่อมค่าเท่ากับ v_π ส่วนระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และเบสนั้นมีค่าทรานส์คอนดักแตนซ์สำหรับสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal transconductance: g_m) เท่ากับ I_C / V_T (หรือบางครั้งอาจจะแทนด้วยอัตราขยายกระแส $\beta = I_C / I_B$) อย่างไรก็ดี กระแส i_C นอกจากจะขึ้นกับแรงดันที่เบส-อิมิตเตอร์แล้ว ยังมีค่าขึ้นกับแรงดันที่เบส-คอลเลกเตอร์อีกด้วย

เนื่องจากเมื่อแรงดันย้อนกลับที่ตกคร่อมรอยต่อเบส-คอลเลกเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น บริเวณปลอดพาหะรอบๆ รอยต่อดังกล่าวจะมีขนาดกว้างขึ้น ส่งผลให้ความกว้างที่เบสมีค่าแคบลง และกระแส i_C มีค่าสูงขึ้น เราเรียกว่า **"ปรากฏการณ์เออร์ลีย์ (Early effect)"** ทำให้เกิดความต้านทานระหว่างขาคอลเลกเตอร์และเบส (r_o) ด้วย



(ก)

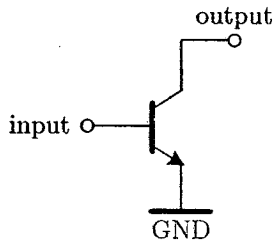


(ข)

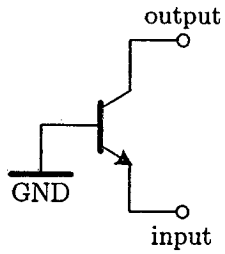
ภาพที่ 15 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กแบบไฮบริดพายของทรานซิสเตอร์ชนิด (ก) NPN และ (ข) PNP

ค) การนำทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ไปใช้งานเป็นวงจรขยายสัญญาณ

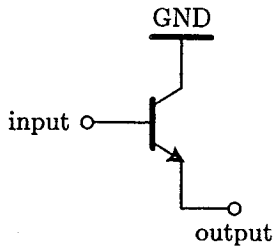
การใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ไปใช้ในการขยายสัญญาณ เราสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะคือ วงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วม (common emitter) วงจรขยายแบบเบสร่วม (common base) และวงจรขยายแบบคอลเลกเตอร์ร่วม (common collector) ซึ่งวงจรขยายแต่ละแบบแสดงได้ดังภาพที่ 16 (แสดงเฉพาะโครงสร้าง)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 16 ลักษณะของวงจรขยายสัญญาณแบบพื้นฐานที่ใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ (ก) วงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วม (ข) วงจรขยายแบบเบสร่วม และ (ค) วงจรขยายแบบคอลเลกเตอร์ร่วม

โดยภาพที่ 16(ก) เป็นวงจรขยายสัญญาณที่มีลักษณะเด่นคือ มีค่าอัตราขยายสูง เกิดการกลับเฟสของสัญญาณทางเอาต์พุตเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต มีความต้านทานขาเข้าสูงปานกลาง และมีความต้านทานขาออกสูง

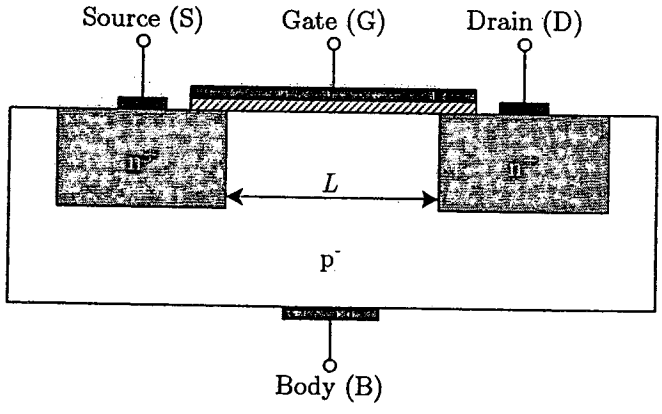
ภาพที่ 16(ข) เป็นวงจรขยายสัญญาณที่มีลักษณะเด่นคือ มีค่าอัตราขยายสูง เกิดการกลับเฟสของสัญญาณทางเอาต์พุตเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต มีความต้านทานขาเข้ามีค่าต่ำกว่าภาพที่ 16(ก) มาก และอัตราขยายโดยรวมของวงจรก็มีค่าต่ำมากเช่นกัน ส่วนความต้านทานขาออกมีค่าเท่ากับความต้านทานภายนอกที่ต่อเข้าที่ขาคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ดังนั้น เราจึงใช้วงจรขยายนี้ในโหมดกระแสทางกว่าโหมดแรงดัน (สัญญาณทางอินพุตจะอยู่ในรูปกระแสเสียเป็นส่วนใหญ่)

ส่วนภาพที่ 16(ค) เป็นวงจรขยายสัญญาณที่มีลักษณะเด่นคือ อัตราขยายมีค่าประมาณ 1 มีความต้านทานขาเข้าสูง ส่วนความต้านทานขาออกมีค่าต่ำ เราจึงใช้เป็นวงจรบัฟเฟอร์

3.7 ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า

ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าหรือที่เรียกกันว่า **"มอสเฟต"** ย่อมาจากคำว่า Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET) ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน เพราะในกระบวนการผลิตสมัยใหม่สามารถบรรจุวงจรรวมทางด้านดิจิตอลที่มีความซับซ้อนให้อยู่บนฐานรองเดียวกันได้ จึงทำให้ได้วงจรรวมขนาดเล็ก โดยทั่วไปแล้ว มอสเฟต แบ่งได้สองประเภทคือ NMOS (N-channel MOSFET) และ PMOS (P-channel MOSFET) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มี 4 ขา

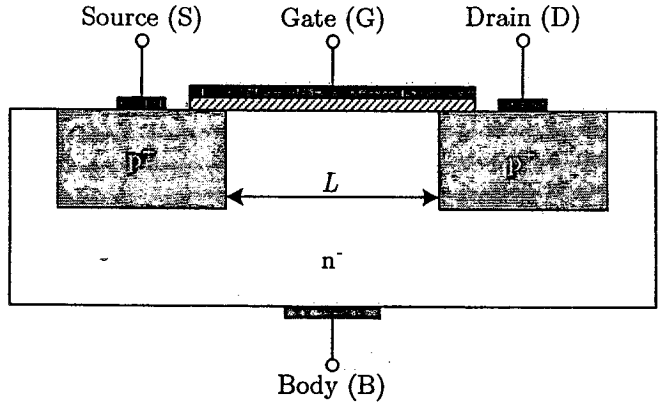
กรณีทรานซิสเตอร์ประเภท NMOS ประกอบด้วย ขาเกท (gate: G) เป็นขั้วที่ทำหน้าที่ต่อกับชั้นตัวนำ ส่วนขาเดรน (drain: D) และ ขาซอร์ส (source: S) เป็นขั้วที่ต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n^+) ส่วนขาบอดี้ (body: B) เป็นขาที่ต่ออยู่กับโครงสร้างของอุปกรณ์ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p^-) ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ภาคตัดขวางของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าประเภท NMOS

จากภาพที่ 17 จะเห็นว่า ระหว่างขาเกทและขาบอดี้ ประกอบด้วยชั้นตัวนำ [สมัยก่อนทำจากโลหะอลูมิเนียม แต่ปัจจุบันจะใช้โพลีซิลิกอน (poly-silicon)] ถัดลงมาเป็นชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรือเรียกสั้นๆ ว่าชั้นออกไซด์ (Oxide) และชั้นถัดมาเรียกว่าชั้นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เมื่อพิจารณาภาพที่ 17 อีกครั้ง จะเห็นได้ว่า NMOS มีโครงสร้างที่สมมาตร เราสามารถสลับกันระหว่างขาเดรนกับขาซอร์สได้ แต่ในทางปฏิบัติ เราจะให้แรงดันที่ขาเดรนมีค่าสูงกว่าขาซอร์ส ($V_D > V_S$) เสมอ ส่วนแรงดันที่ป้อนให้ที่ขาเกทนั้น ถ้ามีค่าน้อยกว่าแรงดันที่ขาเดรนและขาซอร์สแล้ว ($V_G < V_D, V_S$) จะทำให้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้านี้ไม่ทำงาน จึงไม่มีกระแสไหลจากขาเดรนไปยังขาซอร์สได้ (เสมือนเปิดวงจรระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส: $I_{DS} = 0$) ในทางตรงข้าม หากเราให้แรงดันที่ขาเกทสูงจะเกิดช่องนำกระแสระหว่างขาเดรนกับขาซอร์สได้ ยังผลให้เกิดกระแสไหลจากขาเดรนไปหาขาซอร์ส ($I_{DS} > 0$) การต่อใช้งานในวงจร ขาบอดี้นิยมต่อเข้ากับแรงดันต่ำสุดของวงจร

กรณีทรานซิสเตอร์ประเภท PMOS ประกอบด้วย ขาเกท (gate: G) เป็นขั้วที่ทำหน้าที่ต่อกับชั้นตัวนำ ส่วนขาเดรน (drain: D) และ ขาซอร์ส (source: S) เป็นขั้วที่ต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p^+) ส่วนขาบอดี้ (body: B) เป็นขาที่ต่ออยู่กับโครงสร้างของอุปกรณ์ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n^-) ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ภาคตัดขวางของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าประเภท PMOS

พิจารณาภาพที่ 18 จะเห็นได้ว่า PMOS มีโครงสร้างที่สมมาตร สามารถสลับขาเดรนกับขาซอร์สได้ ในทางปฏิบัติ เราจะให้แรงดันที่ขาซอร์สมีค่าสูงกว่าขาเดรน ($V_S > V_D$)เสมอ ส่วนแรงดันที่ป้อนให้ที่ขาเกทนั้น ถ้ามีค่ามากกว่าแรงดันที่ขาเดรนและขาซอร์สแล้ว ($V_G > V_D, V_S$) จะทำให้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้านี้ไม่ทำงาน จึงไม่มีกระแสไหลจากขาซอร์สไปยังขาเดรนได้ (เสมือนเปิด

วงจรระหว่างขาซอร์สและขาเดรน: $I_{SD} = 0$) ในทางตรงข้าม หากเราให้แรงดันที่ขาเกทสูงจะเกิดช่องนำกระแสระหว่างขาซอร์สกับขาเดรนได้ ยังผลให้เกิดกระแสไหลจากขาซอร์สไปหาขาเดรน ($I_{SD} > 0$)การต่อใช้งานในวงจร ขาบอดี้นิยมต่อเข้ากับแรงดันสูงสุดของวงจร

ก) **การทำงานทางกายภาพ**

กรณีทรานซิสเตอร์ชนิด NMOS

เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ สมมติให้ ทุกขาของทรานซิสเตอร์ประเภท NMOS ถูกต่อเข้ากับกราวด์ กรณีเช่นนี้จะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นที่บริเวณรอยต่อ (p^--n^+) นั่นคือรอยต่อ B-S และรอยต่อ B-D

เมื่อเริ่มทำให้แรงดันที่เกทมีค่าเป็นลบ ($V_G < 0$) โฮลในบริเวณขาบอดี้จะถูกดึงดูดขึ้นมาบริเวณข้างบน ทำให้เกิดบริเวณ p^+ ขึ้นเรียกว่า **"บริเวณรวมตัว (accumulation region)"** ขึ้นใต้ชั้นออกไซด์

ในทางตรงข้าม ถ้าทำให้แรงดันที่เกทมีค่าเป็นบวกเล็กน้อย ($v_{GS} > 0$) โฮลจะถูกผลักออกจากบริเวณข้างบน ทำให้เกิด **"บริเวณปลอดพาหะ (depletion region)"** ขึ้นใต้ชั้นออกไซด์

ถ้าเราให้แรงดันที่เกทมีค่าเป็นบวกเพิ่มสูงขึ้นถึง***แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน*** (threshold voltage: V_{tn}) แล้ว สนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์จะดึงดูดอิเล็กตรอนอิสระที่เป็นพาหะส่วนน้อยในบริเวณขาบอดี้ขึ้นมาทำให้เกิด **"ชั้นผันแปร (inversion layer)"** ชนิด N ขึ้นใช้ชั้นออกไซด์ ทั้งนี้ชั้นผันแปรจะเสมือนเป็น **"ช่องนำกระแส (channel)"** เชื่อมต่อระหว่างบริเวณเดรนและซอร์สภายใต้เงื่อนไข $v_{GS} = v_{GD} > V_{tn}$ โดยความต้านทานของช่องนำกระแส ($R_{channel}$) มีค่าแปรผกผันกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระภายในช่องนำกระแสและแปรผันโดยตรงกับแรงดัน $V_{eff} = v_{GS} - V_{tn}$

หลังจากเกิดช่องนำกระแสระหว่างขาเดรนกับขาซอร์สแล้ว หากเราป้อนแรงดัน v_{DS} ระหว่างขาเดรนและซอร์สจะทำให้เกิดกระแสไหลจากขาเดรนไปยังขาซอร์สได้ค่าเท่ากับ $i_{DS} = v_{DS} / R_{channel}$ นั่นแสดงว่า ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าประเภท NMOS นี้จะทำตัวเสมือนเป็นตัวต้านทานที่ถูกควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า หรือหากพิจารณาในรูปกระแสอาจกล่าวได้ว่าทรานซิสเตอร์นี้ใช้สนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ในการควบคุมกระแส เราจึงเรียกทรานซิสเตอร์นี้ว่าเป็น **"ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า"**

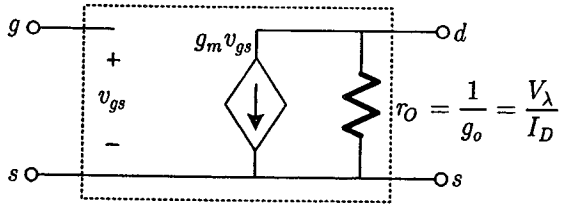
กรณีทรานซิสเตอร์ชนิด PMOS

การอธิบายการทำงานของทรานซิสเตอร์ไฟฟ้าประเภท PMOS สามารถอธิบายเช่นเดียวกับ NMOS แต่มีแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนเป็น V_{tp} น้อยกว่าศูนย์ ($V_{tp} < 0$) และ $V_{eff} = v_{SG} - |V_{tp}|$

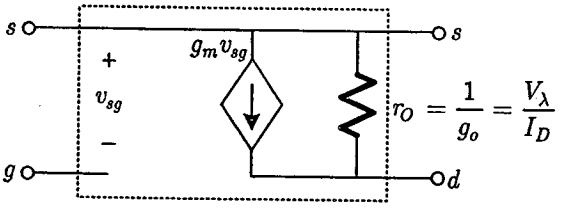
สถานะ	เงื่อนไข	ช่องนำกระแส
คัตออฟ	$v_{SG} < \|V_{tp}\|$ หรือ $V_{eff} < 0$	ไม่มี
ไทรโอด	$v_{SG} > \|V_{tp}\|$ และ $v_{SD} < V_{eff}$ หรือ $V_{eff} > v_{SD} > 0$	ต่อเนื่องระหว่างเดรนและซอร์ส
แอกทีฟ	$v_{SG} > \|V_{tp}\|$ และ $v_{SD} > V_{eff}$ หรือ $v_{SD} > V_{eff} > 0$	ถูกตัดขาด ณ จุดใกล้ซอร์ส

ข) แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก

การวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า จะใช้การวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal model) ของทรานซิสเตอร์ เพราะสามารถใช้ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าช่วยวิเคราะห์ผลลัพธ์ได้



(ก)



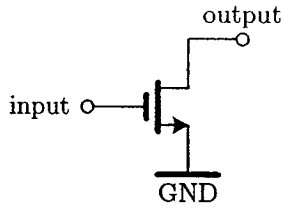
(ข)

ภาพที่ 19 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่รวมผลของการแปรผันความยาวช่องกระแส กรณี (ก) NMOS และ (ข) PMOS

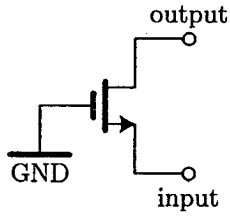
จากภาพที่ 19 เป็นแบบจำลอง ณ ความถี่ต่ำประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสค่าเท่ากับ $g_m v_{gs}$ ซึ่งถูกควบคุมด้วยแรงดันระหว่างขาเกทและขาซอร์ส (v_{gs}) และความต้านทานทางเอาต์พุตซึ่งต่อขนานระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส r_o มีค่าเท่ากับ $1/g_o = V_\lambda / I_D$

ค) การนำทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้าไปใช้งานเป็นวงจรขยายสัญญาณ

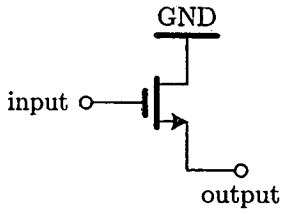
การใช้ทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้าไปใช้ในการขยายสัญญาณ เราสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะคือ วงจรขยายแบบซอร์สร่วม (common source) วงจรขยายแบบเกทร่วม (common gate) และวงจรขยายแบบเดรนร่วม (common drain) ซึ่งวงจรขยายแต่ละแบบแสดงได้ดังภาพที่ 20 (แสดงเฉพาะโครงสร้าง)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 20 ลักษณะของวงจรขยายสัญญาณแบบพื้นฐานที่ใช้ทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า (ก) วงจรขยายแบบซอร์สร่วม (ข) วงจรขยายแบบเกทร่วม และ (ค) วงจรขยายแบบเดรนร่วม

โดยภาพที่ 20(ก) เป็นวงจรขยายสัญญาณที่มีลักษณะเด่นคือ อัตราขยายมีค่าสูง และเกิดการกลับเฟสกันระหว่างสัญญาณทางเอาต์พุตกับสัญญาณอินพุต มีความต้านทานขาเข้าสามารถกำหนดจากความต้านทานภายนอกที่ต่อเข้าที่ขาเกท ส่วนความต้านทานขาออกมีค่าเท่ากับความต้านทาน r_o ขนานกับความต้านทานภายนอกที่ต่อที่ขาเดรน

ภาพที่ 20(ข) เป็นวงจรขยายสัญญาณที่มีลักษณะเด่นคือ สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตมีเฟสเดียวกัน มีอัตราขยายสัญญาณค่อนข้างต่ำ เรื่องจากความต้านทานขาเข้ามีค่าต่ำ ส่วนความต้านทานขาออกมีค่าเท่ากับความต้านทานภายนอกที่ต่อเข้าที่ขาเดรนของทรานซิสเตอร์

ส่วนภาพที่ 20(ค) เป็นวงจรขยายสัญญาณที่มีลักษณะเด่นคือ อัตราขยายมีค่าใกล้เคียง 1 มีความต้านทานขาเข้าสูงกำหนดได้จากความต้านทานภายนอกซึ่งต่อเข้าที่ขาเกท ส่วนความต้านทานขาออกมีค่าต่ำ ด้วยเหตุนี้ เราจึงนำไปใช้เป็นวงจรบัฟเฟอร์ (buffer amplifier หรือบางครั้งเรียกว่าวงจรกันชน)

4. กล่าวสรุป

ในบทนี้ เราได้ทราบวิธีการใช้งานโปรแกรมเบื้องต้น ทีละขั้นตอนแบบ step-by-step พร้อมรูปภาพประกอบซึ่งได้ช่วยให้ผู้อ่านสามารถทำตามได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งได้ทราบการเรียกใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ นอกจากนี้ เรายังได้อธิบายทฤษฎีพื้นฐานที่สำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญเช่น ไดโอด ออปแอมป์ ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์และแบบสนามไฟฟ้า เป็นต้น เพื่อให้นักศึกษาและผู้ที่สนใจได้ศึกษาในรายประเด็นที่สำคัญ โดยเฉพาะคุณสมบัติทางไฟตรงและไฟสลับ รวมไปถึงลักษณะการนำไปใช้งานในรายงานฉบับนี้ด้วย