برق تاسیسات

کارشناسی پیوسته

بخش سوم (ترانزیستور)–۱ جلسه

نام استاد: رحیمی

فصل پنجم

زمان اجرا: ۱۸ ساعت آموزشی

ترانزیستور

هدف کلی

آموزش ساختمان ترانزیستور و کاربرد آن در مدارهای تقویت کننده

هدف‌های رفتاری: پس از پایان این فصل از فراگیرنده انتظار می‌رود که:

۱- تاریخچه‌ی اختراع ترانزیستور را شرح دهد.

۲- ترانزیستور را تعریف کند.

۳- برتری‌های ترانزیستور برلامپ‌های‌الکترونی رانام ببرد.

۴- ساختمان ترانزیستور را شرح دهد.

۵- معادل دیودی ترانزیستور را شرح دهد.

۶- ساختمان ترانزیستور PNP و NPN را شرح دهد.

۷- بایاس ترانزیستور را تشریح کند.

۸- نماد مداری(علامت‌اختصاری)ترانزیستورراتوضیح دهد.

۹- جهت جریان در ترانزیستور را توضیح دهد.

۱۰- ولتاژهای روی پایه‌های ترانزیستور را نام‌گذاری کند.

۱۱- انواع آرایش‌های ترانزیستور را با شکل ساده شرح دهد.

۱۲- منحنی‌های مشخصه‌ی ترانزیستور را در آرایش امیتر مشترک شرح دهد.

۱۳- نواحی کار ترانزیستور (قطع، فعال‌واشباع)راشرح دهد.

۱۴- نواحی کار ترانزیستور را روی مشخصه‌ی خروجی ترانزیستور نشان دهد.

۱۵- نقطه‌ی کار DC را شرح دهد.

۱۶- مختصات نقطه‌ی کار DC را بنویسد.

۱۷- خط بار DC را شرح دهد.

۱۸- معادله‌ی خط بار DC را در یک تقویت کننده بنویسد.

۱۹- خط‌بار DC راروی‌منحنی‌مشخصه‌ی‌خروجی‌رسم کند.

۲۰- نقطه‌ی کار را روی خط بار انتخاب کند و مختصات آن را بنویسد.

۲۱- انواع روش‌های بایاس ترانزیستور را شرح دهد.

۲۲- مقاومت‌های بایاس را با معلوم بودن مختصات نقطه‌ی کار در بایاس مستقیم و اتوماتیک محاسبه کند.

۲۳- ولتاژها و جریان‌های پایه‌های ترانزیستور را در بایاس سرخود محاسبه کند.

۲۴- نحوه‌ی تقویت یک سیگنال متناوب را توسط ترانزیستور تشریح کند.

۲۵- از روی سه منحنی مشخصه‌ی ترانزیستور (که در یک مختصات رسم شده‌اند) نقطه کار DC و نحوه‌ی تقویت سیگنال AC را تشریح کند.

۲۶- با انتخاب یک نوع بایاس (بایاس سرخود) سه نوع آرایش ترانزیستور را با اعمال سیگنال متناوب ترسیم کند.

۲۷- روابط بین جریان‌هاو ولتاژها را در ترانزیستور شرح دهد.

۲۸- برخی مشخصات سه نوع آرایش ترانزیستور را در جدولی با هم مقایسه کند.

۲۹- کلاس‌های مختلف تقویت کنندگی را به صورت بلوکی و فقط با رسم شکل موج ورودی و خروجی توضیح دهید.

۳۰- مقادیر حد در ترانزیستور را شرح دهد.

۳۱- نحوه‌ی استفاده از Data book را شرح دهد.

۳۲- به الگوی پرسش پاسخ دهد.

۳۳- هدف‌های مربوط به حیطه‌ی عاطفی که در فصل اول آمده است را اجراء نماید.

۵-۱ پیش گفتار

یکی دیگر از قطعات اساسی و پُر کاربرد در الکترونیک، ترانزیستور است. ترانزیستور به عنوان سوئیچ، تقویت کننده، تثبیت کننده‌ی ولتاژ و ... در مدارهای الکترونیکی مورد استفاده قرار می گیرد. در این فصل به ساختمان ترانزیستور، بایاسینگ، خط بار، محاسبات مربوط به بایاسینگ و موارد کاربرد آن در تقویت کننده‌های ساده می‌پردازیم.

۵-۲ تاریخچه‌ی اختراع ترانزیستور (Transistor)

در سال ۱۹۰۴ تا ۱۹۴۷ لامپ‌ها تنها وسایل الکترونیکی‌ای بودند که برای تقویت مورد استفاده قرار می گرفتند. در سال ۱۹۰۶، لامپ سه قطبی توسط لی دی فورست ساخته شد و در سال ۱۹۳۰ لامپ‌های چهار قطبی (ترود) و پنج قطبی (پنتود) نیز ساخته شدند. در سال‌های بعد، صنعت الکترونیک به منزله‌ی یک صنعت اصلی و مهم با قابلیّت توسعه‌ی بسیار، مورد توجه قرار گرفت. در ۲۳ دسامبر ۱۹۴۷ صنعت الکترونیک به موفقیّت جدیدی دست یافت. در بعدازظهر این روز والتربراتین و جان باردین عمل تقویت سیگنال را توسط اولین ترانزیستوری، که در لابراتوار کمپانی بل، طراحی و ساخته شده بود، انجام دادند. این ترانزیستور در شکل ۱-۵ نشان داده شده است.

شکل ۱-۵ اولین ترانزیستور ساخته شده در سال ۱۹۴۷

۵-۳ برتری‌های ترانزیستور بر لامپ‌های الکترونی

بعد از اختراع ترانزیستور، برتری‌های این المان نسبت به لامپ‌های الکترونی، به زودی آشکار گشت. به طوری که رادیو و تلویزیون و هم چنین مدارهای الکترونیکی ترانزیستوری، بلافاصله ساخته شدند. در زیر به برخی از برتری‌های ترانزیستور نسبت به لامپ الکترونی اشاره شده است.

الف) کوچک‌تر و سبک‌تر بودن.

ب) احتیاج نداشتن به فیلامان و در نتیجه، نداشتن تلفات حرارتی ناشی از گرم کردن فیلامان.

ج) احتیاج نداشتن به مدت زمان جهت گرم شدن فیلامان.

د) کار کردن در ولتاژهای بسیار کم.

هـ) داشتن تحمل جریان زیاد.

و) استحکام زیاد و داشتن عمر طولانی.

ز) ساده بودن سیم کشی طرح‌های ترانزیستوری.

باید توجه داشت که لامپ‌ها نیز نسبت به ترانزیستورها از برتری‌هایی برخوردارند، از جمله قدرت بسیار بالا، تغییر نکردن نقطه‌ی کار بر اثر گرما و ... ولی ترانزیستور با داشتن برتری‌های فوق در قدرت‌های کم و متوسط جانشین لامپ‌ها شده است. در شکل ۲-۵ ابعاد و شکل ظاهری یک لامپ و یک ترانزیستور نشان داده شده است.

شکل ۲-۵ مقایسه‌ی شکل ظاهری ترانزیستور و لامپ

آقای دکتر جان باردین John Bardeen در سال ۱۹۰۸ در آمریکا متولد شد. او دوبار توانست جایزه‌ی نوبل را دریافت کند. بار اول در سال ۱۹۵۶ به اتفاق آقایان ویلیام شاکلی William Shochly و والتربراتین Walter Brattain به خاطر اختراع ترانزیستور موفق به دریافت جایزه‌ی نوبل شد. برای بار دوم در سال ۱۹۷۲ مجدداً به اتفاق آقایان لئون نیل کوپر Leon Neil Kooper و جان روبرت شریفر John Robert Shriffer به خاطر اختراع ابر رسانا جایزه‌ی نوبل را اخذ نمود. آقای باردین در سال ۱۹۹۱ دارفانی را وداع گفت.

جان باردین

ویلیام شاکلی

والتر برایتن

نفر نشسته شاکلی و دونفر ایستاده باردین و برایتن در آزمایشگاه

۵-۴ ساختمان ترانزیستور

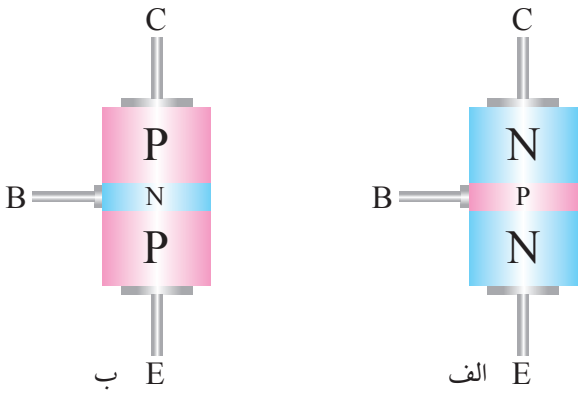
ترانزیستور معمولی، یک المان سه پایه است که از سه کریستال نیمه هادی نوع N و P، که در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، تشکیل شده است. ترتیب قرار گرفتن نیمه هادی‌ها در کنار هم، به دو صورت انجام پذیر است:

الف) دو قطعه نیمه هادی نوع N در دو طرف و نیمه

هادی نوع P در وسط.

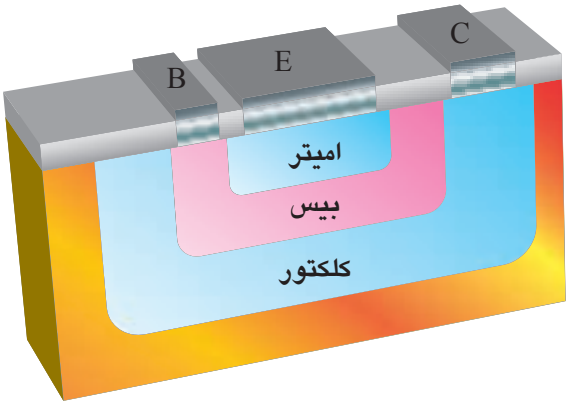
ب) دو قطعه نیمه هادی نوع P در دو طرف و نیمه هادی نوع N در وسط.

در حالت (الف)، ترانزیستور را NPN و در حالت (ب)، ترانزیستور را PNP می‌نامند. شکل ۳-۵ ترتیب قرار گرفتن نیمه هادی‌ها را کنار هم نشان می‌دهد.



شکل ۳-۵ ساختمان ترانزیستور

در شکل ۴-۵، لایه‌های ترانزیستور را مشاهده می‌کنید. پایه‌های خروجی ترانزیستور را به ترتیب امیتر (منتشر کننده= Emitter)، بیس (پایه =Base) و کلکتور (جمع کننده=collector) نام‌گذاری کرده‌اند. امیتر را با حرف E، بیس را با حرف B و کلکتور را با حرف C نشان می‌دهند.

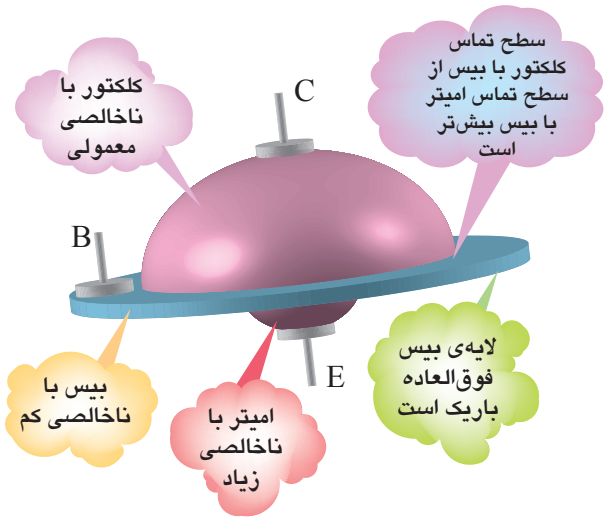


شکل ۴-۵ لایه‌های ترانزیستور

نیمه هادی نوع P یا N که به عنوان امیتر به کار می‌رود، نسبت به لایه‌ی بیس و کلکتور، ناخالصی بیش‌تری دارد. ضخامت این لایه حدود چند ده میکرون است (عملاً حدود ۲۰-۲۰۰μm) و سطح تماس آن نیز به میزان فرکانس و قدرت ترانزیستور بستگی دارد.

لایه‌ی بیس، نسبت به کلکتور و امیتر، ناخالصی کم‌تری دارد و ضخامت آن نیز به مراتب از امیتر و کلکتور کم‌تر است و عملاً از چند میکرون تجاوز نمی‌کند.

ناخالصی لایه‌ی کلکتور از امیتر کمتر و از بیس بیش‌تر است. ضخامت این لایه به مراتب از امیتر بزرگ‌تر است، زیرا تقریباً تمامی تلفات حرارتی ترانزیستور در کلکتور ایجاد می‌شود. شکل ۵-۵ تصویری از نسبت تقریبی لایه‌ها را نشان می‌دهد. سطح تماس کلکتور با بیس، حدوداً نه برابر سطح تماس امیتر با بیس است.

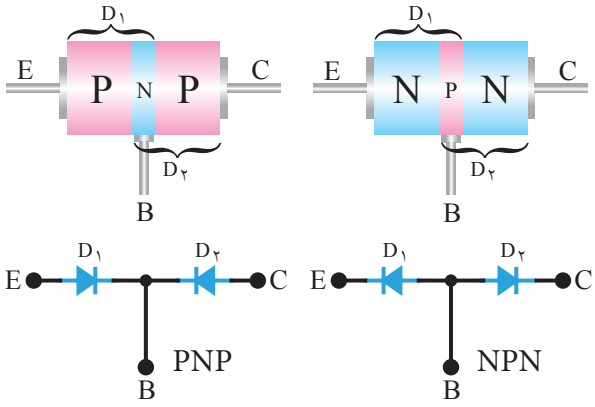


شکل ۵-۵ نمایش نسبت تقریبی لایه‌های ترانزیستور

این نوع ترانزیستورها را به اختصار BJT (**B**ipolar **J**unction **T**ransistor) می‌نامند. عبارت Bipolar یا دو قطبی، از عملکرد الکترون‌ها و حفره‌ها که حامل‌های جریان هستند، ناشی می‌شود.

۵-۵ معادل دیودی ترانزیستور

هر ترانزیستور، دارای سه پایه و دو پیوند است. هر پیوند را می‌توان به صورت یک دیود نشان داد. در نتیجه، معادل دیودی یک ترانزیستور به صورت دو دیود (مطابق شکل ۶-۵) نشان داده می‌شود.



شکل ۶-۵ معادل دیودی ترانزیستور

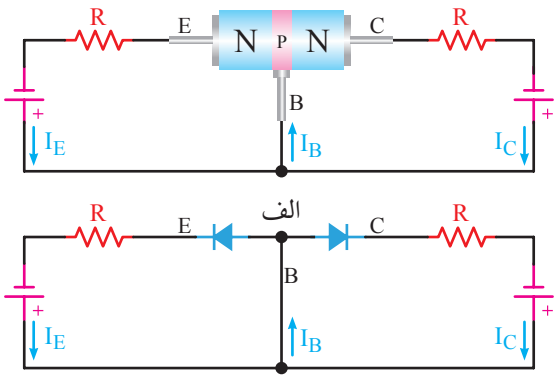
۶-۵ عملکرد ترانزیستور

۱-۶-۵ بایاس ترانزیستور: برای این که بتوان از ترانزیستور به عنوان تقویت کننده، سوییچ و ... استفاده نمود، ابتدا باید ترانزیستور را از نظر ولتاژ dc تغذیه کرد، عمل تغذیه ولتاژ پایه‌های ترانزیستور را بایاس ترانزیستور می‌نامند.

با توجه به این که ترانزیستور دارای سه پایه‌ی مجزّاست، می‌توانیم یکی از پایه‌ها را پایه‌ی مشترک و دو پایه‌ی دیگر را ورودی و خروجی آن در نظر بگیریم. اتصّال ولتاژ dc به پایه‌های مختلف ترانزیستور، نحوه‌ی کار آن را بیان می‌نماید. نظر به اینکه تعداد پایه‌های ترانزیستور سه عدد است، می‌توانیم ولتاژ dc را به فرم‌های مختلف به ترانزیستور متصّل کنیم. در این قسمت به شرح انواع اتصّال ولتاژ dc به ترانزیستور می‌پردازیم. با این توضیح که در این جا بیس بین ورودی و خروجی مشترک گرفته شده است.

الف) اتصّال بیس- امیتر در بایاس مستقیم و اتصّال بیس- کلکتور نیز در بایاس مستقیم است. شکل ۷-۵-الف این نوع بایاس را نشان می‌دهد. مقاومت R در این شکل برای کنترل جریان به کار رفته است.

شکل ۷-۵-ب مدار معادل شکل ۷-۵- الف است.

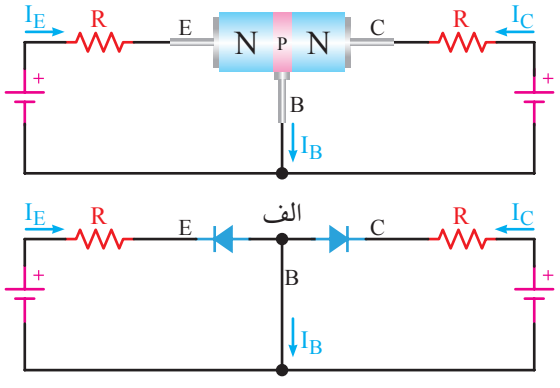


شکل ۷-۵ بایاس موافق در مدار معادل دیودی

همان طوری که از شکل مدار معادل پیداست، در این حالتِ بایاس، دو جریان I_E (جریانی که از امیتر عبور می‌کند) و I_C (جریانی که از کلکتور عبور می‌کند) هر کدام مسیر جداگانه‌ای در دو حلقه طی می‌کنند و فقط در پایه‌ی بیس با یکدیگر جمع می‌شوند و دوباره تقسیم می‌گردند.

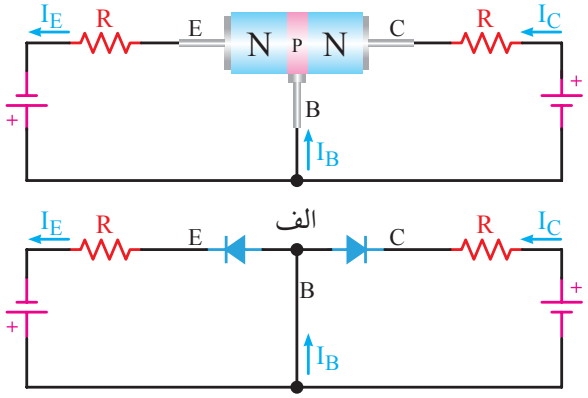
ب) اتصّال بیس- امیتر در بایاس معکوس و اتصّال بیس- کلکتور نیز در بایاس معکوس است. این نوع اتصّال در شکل ۸-۵- الف نشان داده شده است. شکل ۸-۵- ب مدار معادل شکل ۸-۵-الف است. همان طوری که از مدار معادل پیداست، هر دو دیود در بایاس معکوس و قطع‌اند. لذا جریان I_E و I_C برابر صفر است (البته جریان بسیار ضعیفی در اثر شکستن پیوندها در دمای معمولی از مدار عبور می‌کند [جریان اشباع معکوس]، که ما فعلاً

آن را در نظر نمی‌گیریم). ترانزیستور در این حالت هیچ عملی را انجام نمی‌دهد.



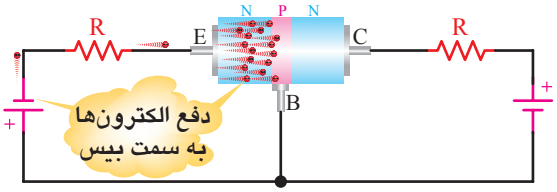
شکل ۸-۵ بایاس مخالف

ج: اتصّال بیس- امیتر در بایاس مستقیم و اتصّال بیس- کلکتور نیز در بایاس معکوس است. شکل ۹-۵- الف و ب این حالت بایاس را نشان می‌دهد.



شکل ۹-۵ بایاس موافق و مخالف

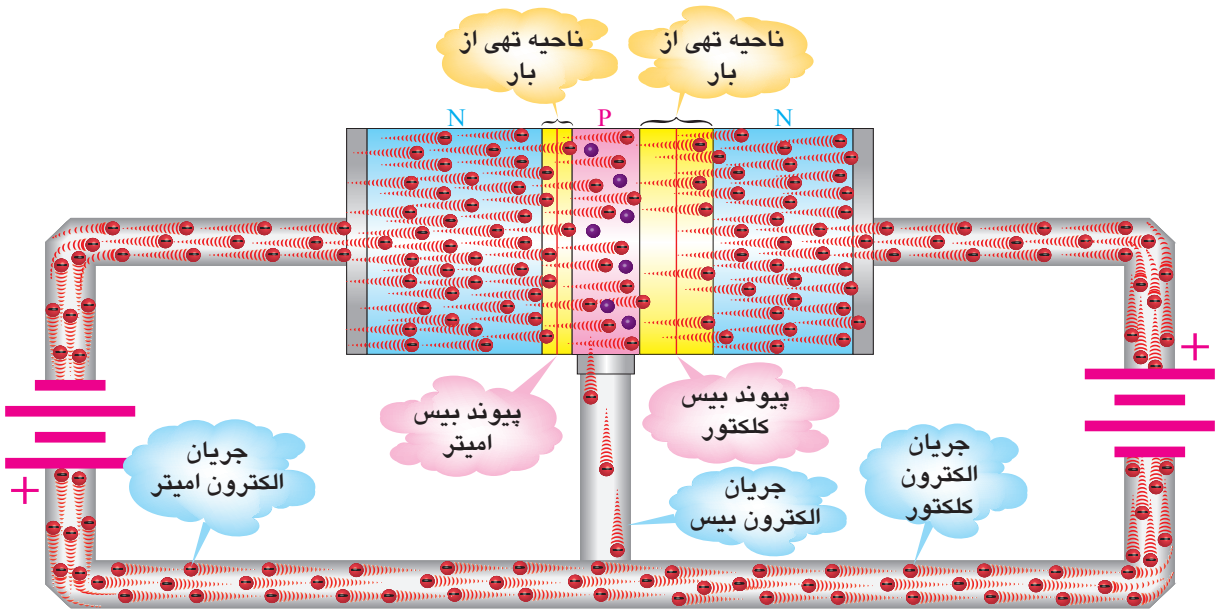
همان طوری که از شکل ۹-۵ پیداست، اتصال بیس - امیتر در بایاس مستقیم است. لذا باید یک جریان در مدار بیس- امیتر داشته باشیم. (در این قسمت استثنائاً جهت جریان را در جهت واقعی الکترون‌ها در نظر می‌گیریم). (شکل ۱۰-۵)



شکل ۱۰-۵ حرکت الکترون‌ها

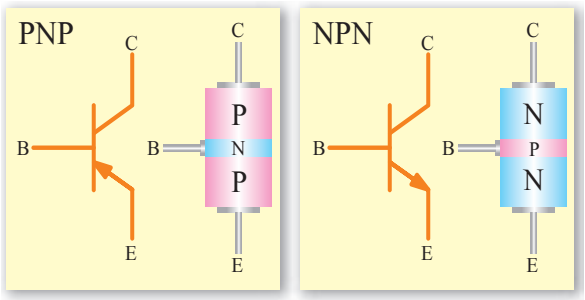
همان طوری که از شکل ۱۰-۵ پیداست، الکترون‌های نیمه هادی نوع N، توسط ولتاژ منفی باتری به سمت بیس رانده می‌شوند. از قبل دانستیم که لایه‌ی بیس نسبت به امیتر و کلکتور ناخالصی کم‌تری دارد و ضخامت آن نیز، نسبت به دو لایه‌ی دیگر فوق‌العاده کم است. در این جا سؤالی پیش می‌آید که آیا این جریان الکترون‌ها مسیر خود را از طریق امیتر- بیس می‌بندند یا اتفّاق دیگری می‌افتد؟

در وهله‌ای اوّل به نظر می‌آید که جریان الکترون‌ها مسیر خود را باید از طریق بیس- امیتر ببندد، ولی عملاً این طور نیست و قسمت اعظم این جریان از طریق کلکتور بسته می‌شود. دلیل این عمل آن است که اوّلاً، به کلکتور ولتاژ مثبت وصل شده است و این ولتاژ قادر است الکترون‌ها را به طرف خود جذب کند. ثانیاً، لایه‌ی بیس بسیار نازک است و الکترون‌ها به محض وارد شدن به لایه‌ی بیس به دلیل کم بودن این فاصله با کلکتور به آن جذب می‌شوند. ثالثاً، سطح کلکتور حدود ۹ برابر بزرگ‌تر از سطح امیتر است، لذا نسبت به ورود الکترون‌ها به لایه‌ی بیس احاطه کامل دارد و تقریباً تمام آن‌ها را جذب می‌کند. رابعاً، ناخالصی بیس کم است و الکترون‌ها با حفره‌ها کم‌تر ترکیب می‌شوند. لذا تقریباً بیش از ۹۵% الکترون‌هایی که به لایه‌ی بیس وارد می‌شوند، مدار خود را از طریق کلکتور می‌بندند. شکل ۱۱-۵، نسبت تقسیم تقریبی الکترون‌ها بین کلکتور و بیس را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱-۵ الکترون‌های عبوری از بیس و کلکتور

۵-۶-۲ نماد فنی ترانزیستور: برای ساده‌تر نشان دادن ترانزیستورها در نقشه‌ها از علامت اختصاری استفاده می‌شود. شکل ۱۲-۵، نماد فنی ترانزیستورهای PNP و NPN را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲-۵ علامت قراردادی ترانزیستورهای PNP و NPN

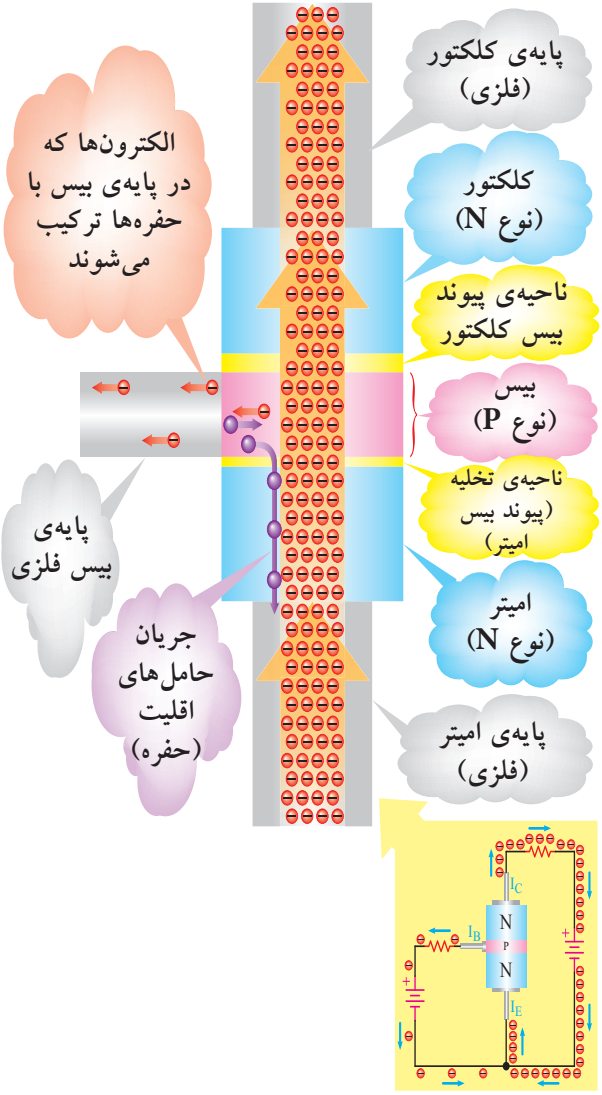
جهت فلش در نماد فنی ترانزیستور، نشان دهنده‌ی جهت دیود امیتر – بیس است.

۵-۶-۳ جهت جریان‌ها در ترانزیستور: جریانی که از کلکتور عبور می‌کند با حرف I_C، جریانی که از بیس عبور می‌کند با حرف I_B و جریانی که از امیتر عبور می‌کند با حرف I_E نشان داده می‌شود. همان طوری که در شکل ۱۳-۵ نشان داده شده است، جریانی که از امیتر عبور می‌کند، به دو انشعاب تقسیم می‌شود. قسمت بسیار کمی از جریان از بیس و قسمت اعظم آن از کلکتور عبور می‌کند. لذا جریان امیتر برابر است با جریان بیس به علاوه‌ی جریان کلکتور، یعنی:

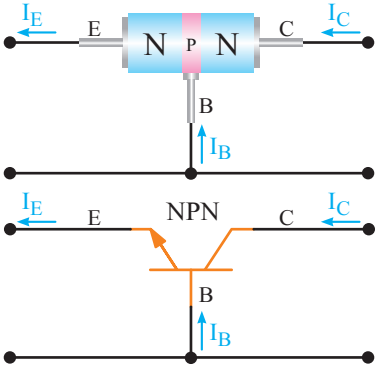
$$I_E = I_B + I_C$$

برای سادگی و درک جهت جریان، معمولاً جهت قراردادی را در نظر می‌گیرند. در جهت قراردادی، جریان از قطب مثبت باتری یا منبع تغذیه خارج و پس از عبور از مدار خارجی، به قطب منفی آن وارد می‌شود. در شکل‌های ۱۴-۵ و ۱۵-۵، جهت قراردادی جریان در ترانزیستورهای NPN و PNP نشان داده شده است. جهت جریان قراردادی، همیشه با جهت دیود بیس- امیتر مطابقت دارد.

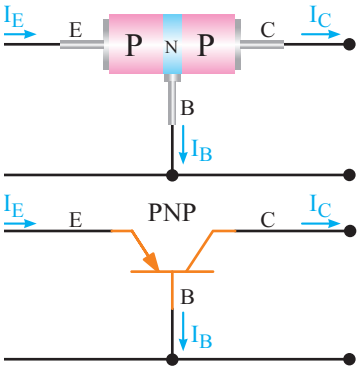
همان طوری که در شـکل‌ها دیده می‌شـود، رابطه‌ی $I_E = I_C + I_B$ برای هر دو نوع ترانزیستور صادق است.



شکل ۱۳-۵ جهت جریان‌ها



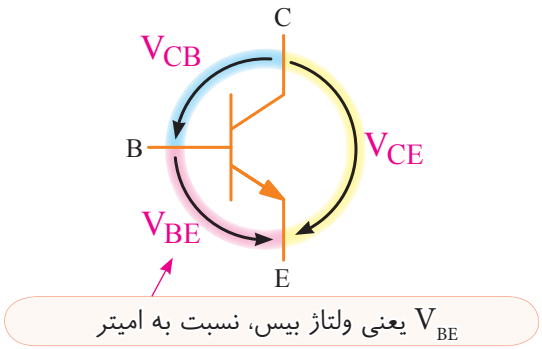
شکل ۱۴-۵ جهت قراردادی جریان در ترانزیستور NPN



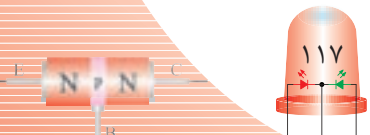
شکل ۱۵-۵ جهت قراردادی جریان در ترانزیستور PNP

۵-۶-۴ نام‌گـذاری ولتاژهـای ترانزیسـتور: برای این که بتـوان از ترانزیسـتور به عنـوان تقویت کننده‌ی سیگنال‌های الکتریکی یا ... استفاده نمود، باید ترانزیستور را با ولتـاژ dc تغذیه کرد. در هر حالـت، ولتاژهایی که به قسـمت‌های مختلف ترانزیستور اعمال می‌شوند، با هم فرق می‌کنند در این قسمت به نام‌گذاری ولتاژ قسمت‌های مختلف می‌پردازیم.

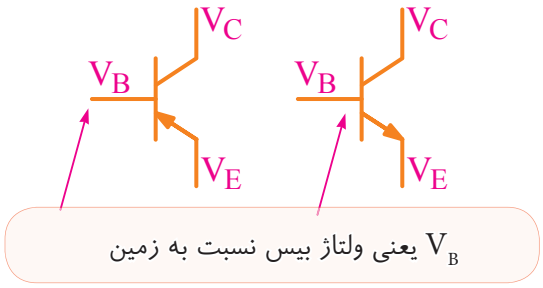
ولتـاژی که بین پایه‌های بیـس و امیتر قرار می‌گیرد با V_{BE}، ولتاژی که در قسمت کلکتور- بیس قرار می‌گیرد بـا V_{CB}، ولتاژی که بین کلکتور- امیتر وصل می‌شـود با V_{CE}، ولتاژ منبع تغذیه‌ی کلکتور را با V_{CC} و ولتاژی که انرژی بیس را تأمین می‌کند با V_{BB} نشـان داده می‌شوند. شـکل ۱۶-۵، ولتاژهای قسـمت‌های مختلف ترانزیستور را نشـان می‌دهد. بیـن ولتاژهـای ترانزیسـتور، رابطه‌ی $V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$ برقرار است.



شکل ۱۶-۵ نام‌گذاری ولتاژ بین پایه‌ها



ولتاژ هر پایه، را نسبت به زمین یا نسبت به هر مرجع دیگری، با حرف V و نام پایه مورد نظر نشان می‌دهند. مثلاً V_C پتانسیل (ولتاژ) پایه‌ی کلکتور نسبت به زمین است. در شکل ۱۷-۵، ولتاژ نقاط مختلف یک ترانزیستور نسبت به زمین، نشان داده شده است.



شکل ۱۷-۵ ولتاژ هر پایه‌ی ترانزیستور نسبت به زمین

۵-۷ آرایش‌های ترانزیستور

آرایش ترانزیستور در مدار، به سه صورت امیتر مشترک، بیس مشترک و کلکتور مشترک است. در این جا به بررسی مختصر هر آرایش و سبب نام‌گذاری آن‌ها می‌پردازیم.

۵-۷-۱ پایه‌ی مشترک در ترانزیستور: در ترانزیستور، همیشه سیگنال ورودی به دو پایه از سه پایه‌ی ترانزیستور داده می‌شود و سیگنال خروجی از دو پایه‌ی آن گرفته می‌شود؛ به طوری که یکی از پایه‌ها بین ورودی و خروجی، مشترک است. لذا، با توجه به پایه‌ی مشترک، نام آرایش انتخاب می‌شود.

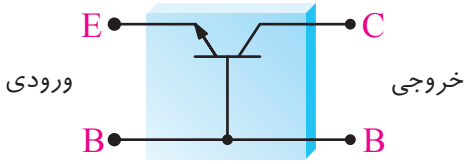
۵-۷-۲ آرایش امیتر مشترک (Common Emitter):

در این آرایش پایه‌ی امیتر، بین ورودی و خروجی مدار مشترک است. و سبب نام‌گذاری این آرایش نیز به دلیل مشترک بودن پایه‌ی امیتر است. در هر آرایشی پایه‌ی مشترک را مبنا قرار می‌دهند و ولتاژهای نقاط مختلف مدار را نسبت به آن اندازه می‌گیرند. شکل ۱۸-۵ آرایش امیتر مشترک را بدون رسم سایر المان‌های مورد نیاز، نشان می‌دهد. آرایش امیتر مشترک، در مدارات کاربرد بیش‌تری دارد.

شکل ۱۸-۵ آرایش امیتر مشترک (CE)

۵-۷-۳ آرایش بیس مشترک (Common Base):

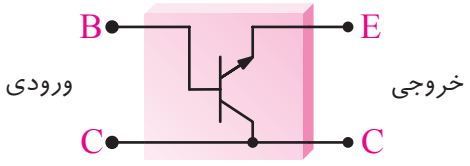
در این آرایش، چون پایه‌ی بیس بین ورودی و خروجی مشترک است. آرایش آن را نیز بیس مشترک نامیده‌اند. شکل ۱۹-۵، این آرایش را به طور ساده نشان می‌دهد.



شکل ۱۹-۵ آرایش بیس مشترک (CB)

۵-۷-۴ آرایش کلکتورمشترک:
(Common Collector)

پایه‌ی مشترک بین ورودی و خروجی، در این آرایش، کلکتور است و به دلیل مشترک بودن پایه‌ی کلکتور نیز به آن کلکتور مشترک می‌گویند. شکل ۲۰-۵، آرایش کلکتور مشترک را نشان می‌دهد. این آرایش را امیتر فالوور (Emitter Follower) نیز می‌گویند.



شکل ۲۰-۵ آرایش کلکتور مشترک (CC)