بخش دوم

ترانزیستورها

مقدمه

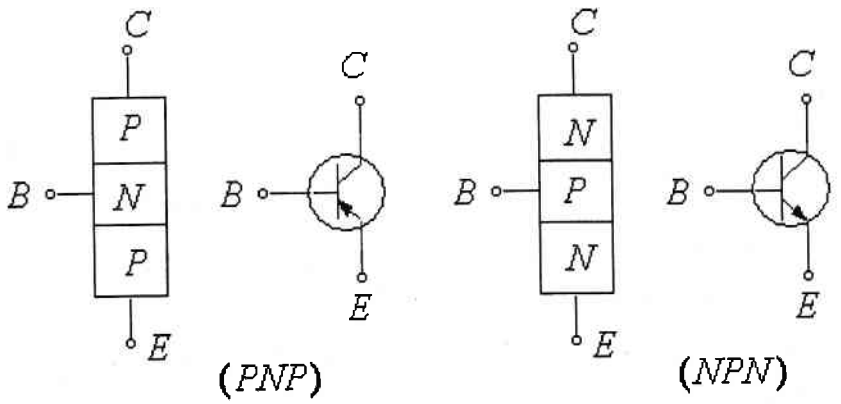
ترانزیستورها دستهٔ بسیار وسیع و با اهمیتی از قطعه‌های الکترونیکی‌اند که در مقایسه با لامپهای خلاء اولیه در وسایلی مثل تقویت کننده‌های رادیو و تلویزیون استفاده از آنها جایگزین مناسبی بود، زیرا ترانزیستورها فیلامان ندارند و در نتیجه توان مصرفی آنها بسیار کم و عمر آنها نیز نامحدود است. همچنین دارای حجم کمی بوده و حرارت کمتری ایجاد می‌کنند. امروزه از ترانزیستورها در تقویت‌کننده‌ها[1]، نوسان‌سازها[2]، مخلوط‌کننده‌ها[3] و آشکارسازها[4] استفاده می‌شود که کاربردهای وسیعی در مدارهای الکترونیکی و مخابرات دارند. ساخت ترانزیستور منجر به اختراعات دیگری از جمله مدارهای مجتمع یا همان آی - سی (IC) شد. یک آی - سی قطعه‌ای است که هزاران و بلکه میلیونها ترانزیستور را می‌تواند در خود جای می‌دهد و پیدایش آی - سی‌ها زمینه را برای تولید دستگاههای مدرن الکترونیکی از جمله کامپیوترهای امروزی فراهم کرد.

---

1. Amplifiers
2. Oscipators
3. Mixers
4. Detectors

ساختمان ترانزیستور

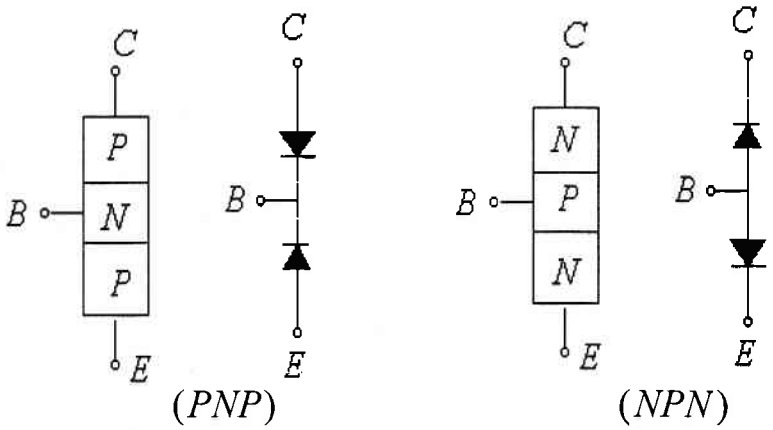
ترانزیستور از سه لایهٔ نیمه رسانای نوع N و P تشکیل می‌شود. لایهٔ میانی بیس (پایه) نامیده می‌شود که نقش کنترل کنندهٔ تعداد حاملها (الکترونها و حفره‌ها) را دارد و با B مشخص می‌شود. دو لایهٔ جانبی یکی امیتر است که به معنی پخش کننده بوده و دهندهٔ حاملهاست و با E مشخص می‌شود و دیگری کلکتور است که به معنی جمع‌کننده بوده و گیرندهٔ حاملهاست و با C مشخص می‌شود. در ترانزیستورهای PNP یا نوع مثبت، بیس از نیمه رسانای نوع N و امیتر و کلکتور از نیمه رسانای نوع P هستند و در ترانزیستورهای NPN یا نوع منفی، بیس از نیمه رسانای نوع P و امیتر و کلکتور از نیمه‌رسانای نوع N هستند. در شکل ۱، علائم مداری ترانزیستورهای PNP و NPN نشان داده شده است.



شکل ۱. علائم مداری ترانزیستورهای PNP و NPN

جهت نشان داده شده در هر دو نوع ترانزیستور، جهت جریان مستقیم پیوند بیس-امیتر را نشان می‌دهد مثلاً در ترانزیستورهای NPN بیس از نوع P و امیتر از نوع N است، بنابراین جهت جریان مستقیم این پیوند از P به N یعنی از بیس به سمت امیتر است.

باتوجه به این که ترانزیستور از سه نیمه رسانا تشکیل شده‌است، می‌توان آن را مشابهٔ دو دیود متوالی که در جهت عکس یکدیگر بسته شده‌اند فرض کرد، (شکل ۲)، که به آن مدل دیودی ترانزیستور می‌گویند.



شکل ۲ . مدل دیودی ترانزیستورهای PNP و NPN

مشخصه‌های خروجی و ورودی در شکل بندیهای مختلف ترانزیستورها

برای ترانزیستورها باتوجه به موارد استفاده‌ای که دارند، شکل‌بندیهای مختلفی وجود دارد که عبارتند از :

الف) بیس مشترک، (C.B)[1]، که در آن بیس سر مشترک ورودی و خروجی است.

ب) امیتر مشترک، (C.E)[2]، که در آن امیتر سر مشترک ورودی و خروجی است.

ج) کلکتور مشترک، (C.C)[3]، که در آن کلکتور سرمشترک ورودی و خروجی است.

هنگام کار ترانزیستور دریک مدار برای آن چهار منطقهٔ متمایز می‌توان در نظر گرفت؛

---

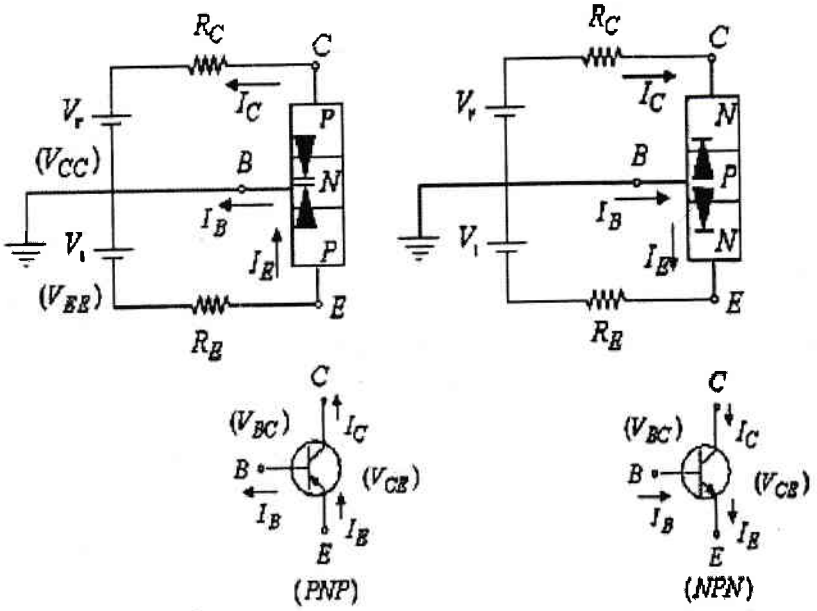
۱. در شکل ۳ ، دو نوع ترانزیستور NPN و PNP در مدار بیس مشترک در نظر گرفته شده‌اند.

1. Common Base 2. Common Emitter 3. Common Collector

منطقه فعال [1]، قطع [2]، اشباع [3] و شکست [4]. وقتی از ترانزیستور در کاربردهای خطی و به ویژه به عنوان تقویت‌کنندهٔ سیگنالهای کوچک استفاده می‌شود بایستی در ناحیهٔ فعال کار کند، در این نوع مدارها تغییراتی در سیگنال ورودی باعث ایجاد تغییرات متناسبی در سیگنال خروجی می‌شود. در حالی که در کاربردهایی از قبیل مدارهای منطقی و کلیدهای دیجیتالی، معمولاً از ترانزیستورها در دو ناحیهٔ قطع و اشباع استفاده می‌شود. در منطقهٔ شکست احتمال خرابی و سوختن ترانزیستور زیاد است و برخلاف دیود زنر، ترانزیستورها برای کار در منطهٔ شکست ساخته نمی‌شوند.

همچنین برای کار یک ترانزیستور در ناحیهٔ فعال بایستی پیوند بیس- امیتر به طور مستقیم و پیوند بیس- کلکتور به طور معکوس تغذیه شوند.

الف) مشخصه‌های خروجی و ورودی در ترکیب بیس - مشترک



شکل ۳ . مدارهای بیس مشترک برای ترانزیستورهای NPN و PNP

در شکل ۳، دو نوع ترانزیستورNPN و PNP در مدار بیس‌مشترک درنظر گرفته شده‌اند.

---

1. Active
2. Cut pff
3. Saturation
4. Break down

در صورتی که ترانزیستور نوع NPN را در نظربگیریم[1]، وقتی پیوند بیس- امیتر به وسیلهٔ ولتاژ V_1 در گرایش مستقیم قراربگیرد، رسانا شده و جریانی از بیس وارد امیتر می‌شود.و یا این که الکترونها از امیتر وارد بیس می‌شوند ولی چون ولتاژ پایهٔ کلکتور مثبت است (C به قطع مثبت V_2 متصل است)، وقتی که الکترونها می‌خواهند وارد بیس شوند با یک قطب مثبت قوی مواجه می‌شوند و بخش بزرگی از آنها به سمت کلکتور کشیده می‌شوند و سپس از کلکتور خارج شده و به قطب مثبت باتری V_2 رفته از منفی آن خارج می‌شوند به قطب مثبت V_1 می‌روند. باتوجه به جهت جریان قراردادی مثل این است که جریانی در مدار خارجی یعنی باتری V_2 ، کلکتور، امیتر و باتری V_1 برقرار شده باشد. بنابراین می‌توان گفت عبور جریان در بیس- امیتر باعث کشیده‌شدن جریانی از کلکتور به امیتر می‌شود.

باتوجه به مدارهای بیس مشترک برای ترانزیستورهای PNP و NPN و این که مجموع جریانهای ورودی یک ترانزیستور با کل جریانهای خروجی از آن باید برابر باشد، به این نتیجه می‌رسیم که برای هر دو نوع ترانزیستور، جمع جبری جریانهای ورودی و خروجی برابر صفر است.

یعنی : $I_E + I_C + I_B = 0$

از طرفی اگر جریانی از بیس تزریق شود و از کلکتور خارج شود، برای جریانی که از کلکتور می‌گذرد از نقطه نظر ریاضی می‌توان نوشت : $-I_C = \alpha I_E$ یا $|\alpha| = \frac{I_C}{I_E}$ که مقدار α معمولاً کمتر از واحد است (حدود ۰/۹۸) و یکی از ویژگیهای هر ترانزیستور است و مقدار آن به ازای تمام مقادیر I_E و I_C ثابت نیست و تنها در ناحیهٔ خاصی به نام ناحیهٔ کار ترانزیستور تقریباً ثابت است. البته به علت این که پیوند کلکتور-بیس به طور معکوس به ولتاژ متصل است، جریان اشباع معکوس که در دیود نیز وجود دارد در

---

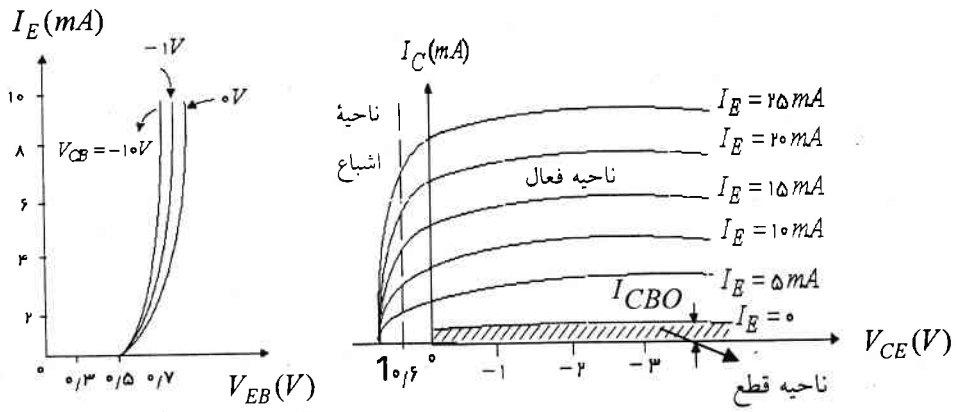
۱. در صورتی که ترانزیستور PNP باشد وقتی دیود بین بیس و کلکتور به وسیلهٔ ولتاژ V_1 در گرایش مستقیم قرار بگیرد ، حفره‌های ناحیهٔ P به ناحیهٔ N و الکترونهای ناحیهٔ N به ناحیهٔ P نفوذ می‌کنند و اگر فقط حفره‌ها را در نظر بگیریم، حفره‌های نفوذی در N طول قسمت میانی را طی کرده و اگر به محل اتصال دوم برسند در اثر میدان مناسب وارد ناحیهٔ سوم می‌شوند و جریانی در خروجی ظاهر می‌شود. شرط ایجاد چنین جریانی این است که حفره‌های نفوذی در N بتوانند قبل از ترکیب به ناحیهٔ سوم رسیده و جذب شوند. و بنابراین لازم است پهنای ناحیهٔ N (یا در نوع NPN پهنای ناحیهٔ P) از طول نفوذی حفره‌ها در این ناحیه کوچکتر باشد.

اینجا به وجود می‌آید و خلاف جهت جریان تزریقی خواهد بود که آن را با I_{CBO} نشان می‌دهیم. بنابراین جریان کلکتور عبارت است از :

$$I_C = -\alpha I_E + I_{CBO}$$

در حالت بیس مشترک، منحنی تغییرات I_C برحسب V_{CB} به ازای مقادیر ثابت I_E، مشخصهٔ خروجی و نمودار تغییرات I_E برحسب V_{EB} در ولتاژهای متفاوت V_{CB}، مشخصه‌های ورودی ترانزیستور نامیده می‌شوند.

در این حالت همان مقدار جریان که از امیتر وارد می‌شود، به اندازهٔ αI_E وارد کلکتور می‌شود. شکلهای (٤-الف) و (٤-ب) مشخصه‌های خروجی و ورودی ترانزیستور نوعی PNP را در ترکیب بیس مشترک نشان می‌دهند.



الف) مشخصهٔ خروجی ب) مشخصهٔ ورودی

شکل ٤ . مشخصه‌های خروجی و ورودی ترانزیستور نوعی PNP در ترکیب بیس مشترک

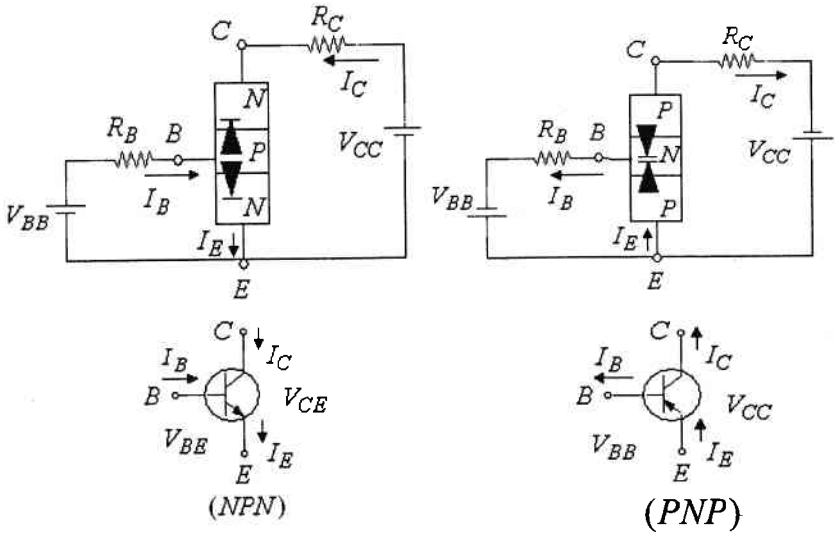
اکنون اگر ترانزیستور را به این ترتیب در نظربگیریم که از بیس جریانی تزریق شود، جریانی بین کلکتور و امیتر برقرار می‌شود، اگر $-I_C=\alpha I_E$ باشد و ترانزیستور را به صورت یک گره در نظر بگیریم، داریم. $I_B + I_E + I_C=0$. از دو رابطهٔ اخیر نتیجه می‌شود که $\frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ که این عبارت را با β نشان می‌دهیم و آن را ضریب تقویت جریان می‌نامیم که کمیت نسبتاً بزرگی است.

بر روی مشخصهٔ خروجی شکل ٤ الف، سه ناحیهٔ مختلف مشخص شده است؛ که در ناحیهٔ قطع هر دو پیوند امیتر– بیس در حالت معکوس هستند بنابراین جریان کلکتور برابر I_{CBO}، بوده و جریان امیتر کوچکتر یا مساوی صفر است، این ناحیه زیر منحنی مربوط به $I_E=0$ و در قسمت V_{CB} های کوچکتر از ۰/٦ ولت است. در ناحیهٔ فعال پیوند امیتر– بیس در حالت مستقیم و پیوند کلکتور– بیس در حالت معکوس است که در این ناحیه جریان کلکتور هیچگونه وابستگی به ولتاژ V_{CB} ندارد و تنها تابع I_E است. در مشخصهٔ خروجی شکل ٤، بخش بالای منحنی $I_E=0$ و سمت راست خط $V_{CB}=0/6V$ به عنوان ناحیهٔ فعال مشخص شده‌است. دیده می‌شود که در این ناحیه جریان خروجی I_C تقریباً تابع خطی جریان ورودی I_E است. (با صرفنظر کردن از I_{CBO}). از این نظر ناحیهٔ فعال را ناحیه خطی مشخصهٔ خروجی می‌گویند. همچنین در ناحیهٔ اشباع، دو پیوند کلکتور–بیس و امیتر–بیس در حالت مستقیم تغذیه شده‌اند. در دو شکل ٤ الف، بخش سمت چپ خط $V_{CB}=0/6V$ را شامل می‌شود. در این ناحیه جریان کلکتور به شدت تحت تأثیر ولتاژ V_{CB} بوده و با افزایش کمی در ولتاژ مثبت V_{CB} ، کاهش قابل ملاحظه‌ای در جریان کلکتور حاصل می‌شود.

در مشخصهٔ ورودی در ترکیب بیش مشترک، شکل ٤ ب، دیده می‌شود که به ازای مقادیر کمتر از ۰/۵ ولت برای V_{EB} جریان امیتر تقریباً صفر است که ۰/۵ ولت در واقع آستانهٔ هدایت پیوند امیتر– بیس برای ترانزیستورهای سیلیکن است، این ولتاژ برای ترانزیستورهای ژرمانیوم حدود ۰/۱ ولت است. در منحنی‌های مشخصهٔ ورودی، با افزایش ولتاژ معکوس V_{CB} و به ازای یک مقدار معین V_{EB}، جریان I_E افزایش می‌یابد.

ب) مشخصه‌های خروجی و ورودی در ترکیب امیتر مشترک

در شکل ۵، دو نوع ترانزیستور PNP و NPN در مدار امیتر مشترک در نظرگرفته شده‌اند. در این ترکیب نحوهٔ قرارگرفتن ترانزیستور به گونه‌ای است که امیتر بین ورودی و خروجی مشترک بوده، ورودی به بیس اعمال می‌شود و خروجی از کلکتور گرفته می‌شود.



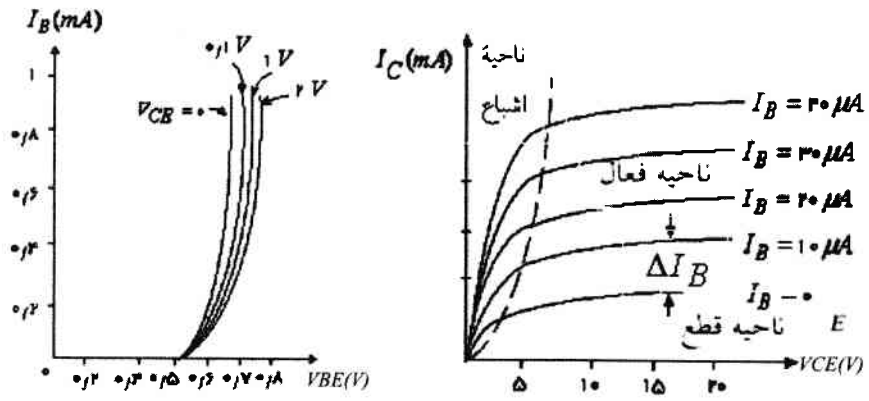
شکل (۵) . مدارهای امیتر مشترک برای ترانزیستورهای PNP و NPN

مشخصهٔ خروجی مدار امیتر مشترک، دسته منحنی‌های تغییرات جریان کلکتور(I_C) برحسب ولتاژ کلکتور- امیتر (V_{CE}) به ازای مقادیر مختلف جریان بیس (I_B) است.

در شکل (٦-الف)، مشخصهٔ خروجی یک ترانزیستور سیلیکن NPN رسم شده است. همان طور که دیده می‌شود جریان کلکتور ترانزیستور حساسیت زیادی نسبت به تغییرات V_{CE} نشان نمی‌دهد. اما به هر حال شیب منحنی‌ها در مقایسه با مشخصه بیس مشترک افزایش قابل توجهی یافته است و جریان بیس به مراتب کوچکتر از جریان امیتر است. مشخصهٔ خروجی ترانزیستور در این مدار را نیز می‌توان به سه ناحیهٔ فعال، قطع و اشباع تقسیم‌بندی کرد.

نواحی مختلف در مشخصهٔ خروجی ترانزیستور نیز عبارتنداز :

الف) ناحیهٔ فعال، که در این ناحیه اتصال بیس-امیتردر حالت هدایت بوده و اتصال بیس-کلکتور در گرایش معکوس است، در نتیجه جریان کلکتور وابستگی کمی



ب الف

شکل ٦. مشخصه‌های خروجی و ورودی ترانزیستور نوعی NPN درترکیب امیتر مشترک

به ولتاژ بیس- کلکتور دارد و جریان کلکتور تقریباً تابعی خطی از جریان ورودی امیتر است. لذا این ناحیه را ناحیهٔ فعال یا ناحیهٔ خطی مشخصهٔ خروجی می‌گویند.

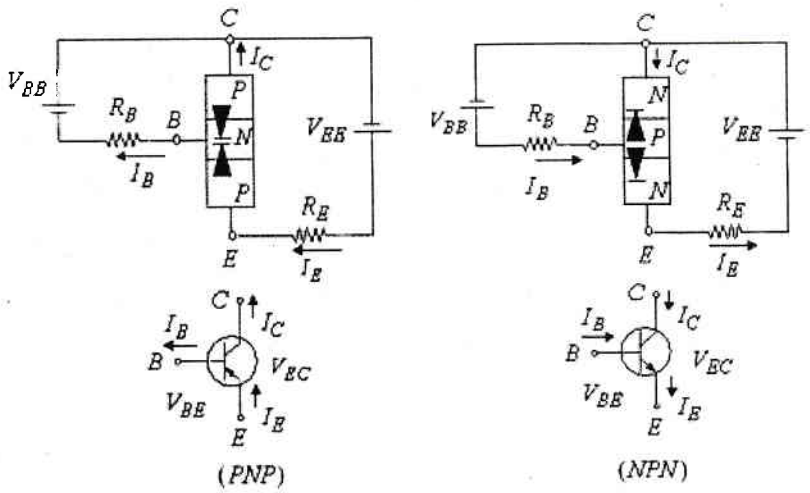
ب) ناحیهٔ اشباع، که در این ناحیه هر دو اتصال امیتر- بیس و امیتر- کلکتور در حالت هدایت هستند. در این ناحیه جریان کلکتور به شدت تحت تأثیر ولتاژ مستقیم بیس - کلکتور بوده و افزایش کمی در ولتاژ مثبت کلکتور- بیس، کاهش زیادی در جریان کلکتور به دنبال دارد. باتوجه به این که $V_{CB}=V_{BE}+V_{CE}$ است، در نتیجه اگر $V_{CE}<V_{BF}$ باشد، اتصال بیس- کلکتور در گرایش مستقیم بوده و I_C به شدت کاهش می‌یابد.

ج) ناحیهٔ قطع، که در این ناحیه هر دو دیود اتصال در حالت قطع بوده و جریان کلکتور فقط جریان اشباع کلکتور - بیس (I_{CBO}) است و جریان امیتر کوچک یا مساوی صفر است.

در مشخصهٔ ورودی در ترکیب امیترمشترک (شکل ٦-ب)، دیده می‌شود که دسته منحنی‌های تغییرات I_B برحسب V_{BE} به ازای مقادیر مختلفِ ولتاژ خروجی V_{CE} از صفر تا ۲ ولت رسم شده‌اند.

ج) مشخصه‌های خروجی و ورودی در ترکیب کلکتور مشترک

دراین نوع ترکیب، کلکتور بین ورودی و خروجی مشترک است. ورودی به بیس داده می‌شود و خروجی از امیترگرفته می‌شود. در این نوع ترکیب معمولاً امپدانس خروجی کمتر از امپدانس ورودی است و بنابراین در تطبیق امپدانسی طبقات متوالی می‌توان از این نوع ترکیب استفاده کرد. در شکل (۷) مدارهای کلکتور مشترک برای دو نوع ترانزیستور PNP و NPN رسم شده‌است. مشخصهٔ خروجی در ترکیب کلکتور مشترک دسته منحنی‌های تغییرات I_E برحسب V_{EC} به ازای مقادیر مختلف I_B است. با درنظرگرفتن این که $I_E \cong I_C$ و $V_{EC}=-V_{CE}$ است، برای طراحی مدار کلکتور مشترک می‌توان از مشخصه‌های خروجی امیترمشترک استفاده کرد. همچنین به جای مشخصه‌های ورودی کلکتور مشترک نیز می‌توان مشخصه‌های ورودی امیترمشترک را مورد استفاده قرارداد.



شکل ۷. مدارهای کلکتور مشترک برای ترانزیستورهای PNP و NPN.