هدف کلی کتاب

آموزش مفاهیم اساسی الکترونیک و مدارهای مرتبط با آن

کتاب الکترونیک عمومی (۲) در شهریورماه ۱۳۹۰ در یک دورهٔ بازآموزی کشوری توسط ۲۸ نفر از هنرآموزان مدرس این درس که از استان‌های مختلف کشور حضور داشته‌اند اعتبار بخشی قضاوتی شده است.

جدول بودجه‌بندی زمانی

شمارهٔ فصل	عنوان فصل	زمان اختصاص داده شده (ساعت آموزشی)
۱	یادآوری دیود و ترانزیستور و آشنایی با تقویت‌کنندهٔ ترانزیستوری	۱۲
۲	مشخصات ویژهٔ تقویت‌کننده‌های ترانزیستوری	۲۰
۳	ترانزیستور اثر میدان (FET)	۱۶
۴	تقویت‌کننده‌های چندطبقه	۱۲
۵	تقویت‌کننده‌های قدرت	۱۲
۶	تقویت‌کنندهٔ تفاضلی	۸
۷	تقویت‌کنندهٔ عملیاتی	۸
۸	تنظیم‌کننده‌های ولتاژ	۱۲
۹	الکترونیک صنعتی	۲۰

کتاب آزمایشگاه مجازی جلد دوم را برای اجرای فعالیت‌های نرم‌افزاری مطالعه نمایید و آزمایش‌های مربوط به آن را اجرا کنید. تقریباً تمام آزمایش‌هایی که امکان اجرای آن وجود دارد را می‌توانید در لوح فشردهٔ ضمیمهٔ کتاب مشاهده کنید.

فصل اوّل

یادآوری دیود و ترانزیستور و آشنایی با تقویت‌کنندهٔ ترانزیستوری

زمان اجرا : ۱۲ ساعت آموزشی

هدف کلی : یادآوری مدارهای دیودی و تقویت‌کننده‌های ترانزیستوری

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

۱ــ ساختمان و نماد مداری دیود را تشریح کند.
۲ــ کاربردهای دیود را بیان کند.
۳ــ ساختمان و نماد مداری ترانزیستور را تشریح کند.
۴ــ با استفاده از Data book و Data Sheet به زبان اصلی، اطلاعات ترانزیستور را استخراج کند و توضیح دهد.
۵ــ انواع ترانزیستورهای قدرت، سیگنال، نوری و ... را توضیح دهد.
۶ــ انواع بایاس ترانزیستور را تشریح کند.
۷ــ مسائل مربوط به بایاس ترانزیستور را حل کند.
۸ــ منحنی‌های مشخصهٔ ورودی، خروجی و انتقالی ترانزیستور را توضیح دهد.
۹ــ اطلاعات قابل استخراج از منحنی‌های مشخصهٔ ورودی، انتقالی و خروجی را شرح دهد.
۱۰ــ با استفاده از اطلاعات قابل استخراج از منحنی‌های ترانزیستور، مسایل مربوطه را حل کند.
۱۱ــ مقاومت استاتیکی و دینامیکی دیود بیس امیتر و قابلیت هدایت انتقالی را محاسبه کند.
۱۲ــ چگونگی تقویت سیگنال ac را توسط ترانزیستور، در آرایش امیتر مشترک و با استفاده از منحنی‌های مشخصه شرح دهد.
۱۳ــ حالت کلیدی ترانزیستور را شرح دهد.
۱۴ــ به سؤال‌های الگوی پرسش پاسخ دهد.

پیش‌گفتار

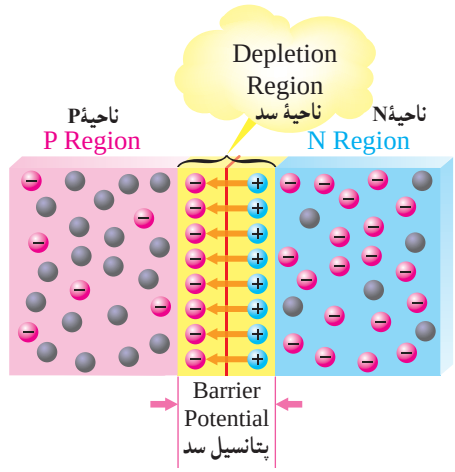
در مورد ساختمان و کاربرد انواع دیود در الکترونیک(۱) به تفصیل بحث شده است. در این مبحث پس از مرور مختصری در مورد ساختمان و نحوهٔ بایاس کردن دیود، به حل مدارهای با دیود می‌پردازیم تا پس از تشخیص وضعیت قطع یا وصل (off-oN) دیود در مدار، در مورد محاسبهٔ جریان و افت ولتاژ و نوشتن معادلهٔ KVL در یک حلقه، مهارت لازم را کسب نمایید. چون ترانزیستور نیز معادل دو دیود است، با حل مسایل دیودی، توانایی تجزیه و تحلیل مدارهای ترانزیستوری نیز آسان خواهد شد.

۱ــ۱ــ یادآوری در مورد دیود

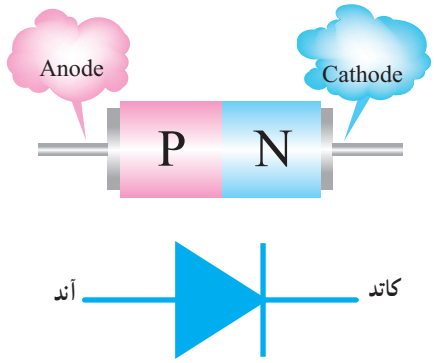
۱ــ۱ــ۱ــ اتصال P ــ N (P ــ N Junction) : اگر یک قطعه نیمه هادی نوع P را به یک قطعه نیمه هادی نوع N وصل کنیم، اتصال P ــ N به وجود می‌آید.

به اتصال P ــ N دیود گویند. شکل ۱ــ۱ اتصال P ــ N و سد ایجاد شده در محل اتصال و پتانسیل سد را نشان می‌دهد.

۱ــ۱ــ۲ــ ساختمان کریستالی و نماد مداری دیود : شکل ۱ــ۲ــ ساختمان کریستالی و علامت اختصاری (نماد) دیود را نشان می‌دهد.

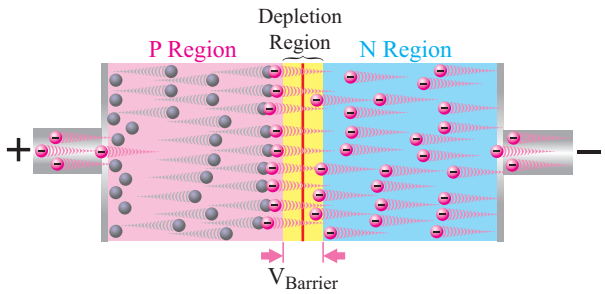


شکل ۱ــ۱ــ اتصال PN و ناحیهٔ سد



شکل ۲ــ۱ــ ساختمان کریستالی و نماد مداری دیود

۳ــ۱ــ۱ــ دیود در بایاس موافق : هرگاه مطابق شکل ۳ــ۱ نیمه هادی نوع P را به قطب مثبت باتری و نیمه هادی نوع N را به قطب منفی باتری اتصال دهید، دیود را در بایاس موافق قرار داده‌اید.

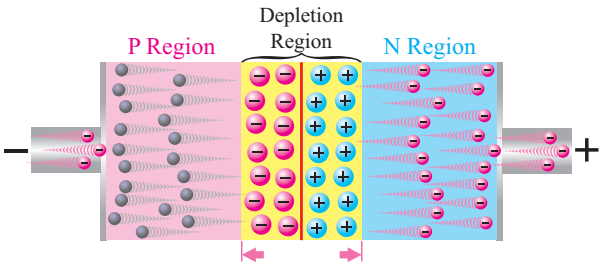


شکل ۳ــ۱ــ دیود در بایاس موافق

اگر جنس دیود سیلیسیم باشد و ولتاژ باتری بیش‌تر از ۰/۶ ولت شود، سد بین P و N شکسته شده و در مدار جریان برقرار می‌شود. در مورد دیود در بایاس موافق باید نکات مهم زیر مورد توجه قرار گیرد.

- اگر در دیود سیلیسیومی ولتاژ آند تقریباً ۰/۶ ولت بیشتر از کاتد آن شود، دیود هدایت می‌کند.
- اگر در دیود ژرمانیومی ولتاژ آند آن تقریباً ۰/۱۵ ولت بیشتر از کاتد آن شود، دیود هدایت می‌کند.
- برای هدایت دیود جریان مدار باید به اندازهٔ کافی باشد.
- در دو سردیودی که در حال هدایت است ولتاژی حدود ۰/۷ ولت افت می‌کند که به آن ولتاژ وصل دیود گویند و آن را با V_γ نشان می‌دهند. ولتاژ وصل برای دیود ژرمانیومی حدود ۰/۲ ولت است.
- در حالت ایده‌آل دیود وصل مانند یک کلید بسته است و $V_\gamma = 0$ است.
- در هنگام وصل دیود، باید جریان عبوری از آن را توسط مقاومتی کنترل نمود تا جریان عبوری از آن، از مقدار ماکزیمم مجاز تجاوز نکند.

۴ــ۱ــ۱ــ دیود در بایاس مخالف : هرگاه مطابق شکل ۴ــ۱ نیمه هادی نوع N را به قطب مثبت باتری و نیمه هادی نوع P را به قطب منفی باتری وصل کنیم دیود در بایاس مخالف قرار می‌گیرد.



شکل ۴ــ۱ ــ دیود در بایاس مخالف

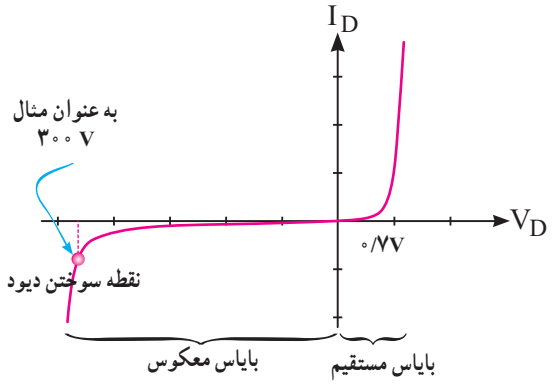
در دیود در بایاس مخالف، سد بین P و N افزایش می‌یابد لذا در این حالت از دیود جریانی به جزء جریان اشباع معکوس عبور نمی‌کند. افزایش ولتاژ منبع، سبب افزایش ناحیهٔ سد می‌شود. در مورد دیود در بایاس مخالف باید نکات مهم زیر مورد توجه قرار گیرد.

- از دیود در بایاس مخالف جریانی به غیر از جریان اشباع

معکوس نمی‌گذرد.

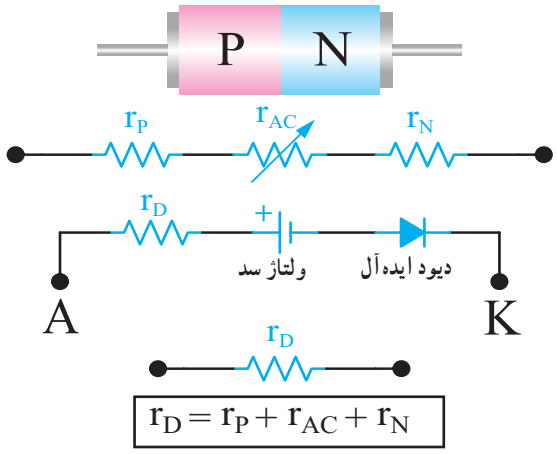
- دیود در بایاس مخالف، در حالت ایده‌آل مانند یک کلید باز است.
- در بایاس مخالف تمام ولتاژ منبع در دو سر دیود افت می‌کند.
- در بایاس مخالف، ولتاژی که در دو سر دیود افت می‌کند نباید از حد اکثر ولتاژ معکوس مجاز دیود بیش‌تر شود.

۵ــ۱ــ۱ــ منحنی مشخصهٔ ولت آمپر دیود : منحنی مشخصهٔ ولت آمپر یک دیود از جنس سیلیسیم در شکل ۵ــ۱ رسم شده است.



شکل ۵ ــ ۱ ــ منحنی مشخصه دیود در بایاس موافق و مخالف

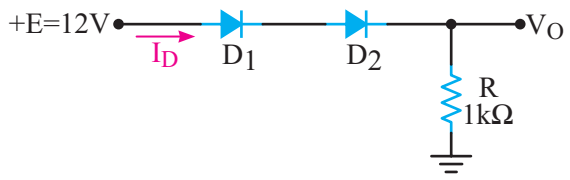
۶ــ۱ــ۱ــ مدار معادل دیود : برای دیود معمولی می‌توان مدار معادلی مانند شکل ۶ــ۱ رسم کرد. در مدار، r_p مقاومت نیمه هادی نوع P، r_N مقاومت نیمه هادی نوع N و r_{Ac} مقاومت لایه سد است.



شکل ۶ــ۱ــ مدار معادل دیود معمولی

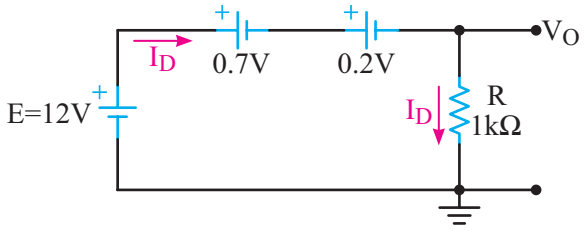
۷ــ۱ــ۱ــ حل برخی مسائل مدارهای دیودی : در مسایل مطرح شده، ابتدا باید وصل یا قطع بودن دیودها تشخیص داده شود، سپس مدار معادل مسئلهٔ مورد نظر ترسیم گردد. در مدار معادل، با نوشتن معادلهٔ KVL می‌توان جریان مدار، افت ولتاژ دو سر هر قطعه و سایر مجهولات مورد نظر را محاسبه نمود.

مثال ۱ــ۱ : در شکل ۷ــ۱ اگر دیود D_1 از جنس سیلیسیم و ولتاژ وصل آن ۰/۷ ولت و دیود D_2 از جنس ژرمانیوم و ولتاژ وصل آن ۰/۲ ولت باشد، I_D و V_O را محاسبه کنید.



شکل ۷ــ۱

پاسخ : چون مثبت منبع E+ به آند دیودها وصل است، دیودها در بایاس موافق و در حال هدایت هستند. می‌توان افت ولتاژ دو سر دیودها در مدار شکل ۷ــ۱ را به صورت شکل ۸ــ۱ در نظر گرفت.



شکل ۸ ــ ۱

با نوشتن معادله KVL می‌توان I_D را محاسبه نمود.

$$-۱۲ + ۰/۷ + ۰/۲ + ۱\ I_D = ۰$$

$$I_D = \frac{۱۲ - ۰/۹}{۱K\Omega} = ۱۱/۱mA$$

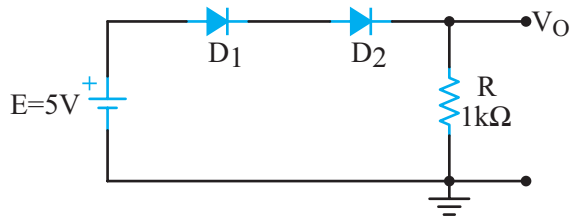
محاسبهٔ V_O :

$$V_O = RI_D = (۱K\Omega)(۱۱/۱mA)$$

V_O=۱۱/۱ ولت

توجه : در مسائل، اگر ولتاژها برحسب ولت (V) و مقاومت‌ها برحسب کیلواهم (KΩ) باشد، جریان‌ها برحسب میلی‌آمپر (mA) است.

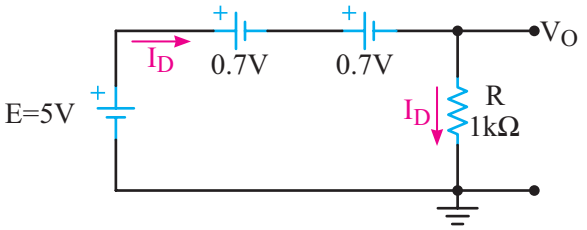
مثال ۲ــ۱ : با توجه به شکل ۹ــ۱ I_{D1} و I_{D2} و V_O را محاسبه کنید. هر دو دیود از جنس سیلیسیم و ولتاژ وصل آن‌ها ۰/۷ ولت است.



شکل ۹ــ۱

پاسخ : چون مثبت منبع E به آند دیودها وصل است، دیودها در بایاس موافق و در حال هدایت هستند.

می‌توان مدار معادل شکل ۹ــ۱ را به صورت شکل ۱۰ــ۱ رسم نمود.



شکل ۱۰ــ۱ ــ مدار معادل شکل ۹ــ۱

با نوشتن معادلهٔ KVL می‌توان I_D را محاسبه نمود.

$$-۵ + ۰/۷ + ۰/۷ + ۱I_D = ۰$$

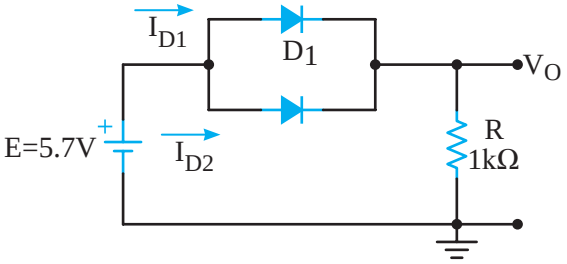
$$I_D = \frac{۵ - ۱/۴}{۱K\Omega} = ۳/۶mA$$

محاسبهٔ V_O :

$$V_O = RI_D$$

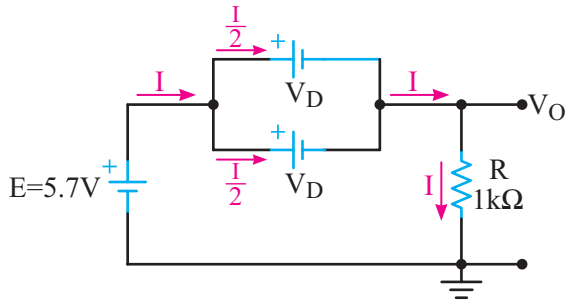
$$V_O = (۱K)(۳/۶mA) = ۳/۶V$$

مثال ۳ــ۱ : با توجه به شکل ۱۱ــ۱ I_{D1} و I_{D2} و V_O را محاسبه کنید. هر دو دیود از جنس Si و ولتاژ وصل آن‌ها ۰/۷ ولت است. دیودها کاملاً مشابه هستند.



شکل ۱۱ــ۱

پاسخ : چون مثبت منبع E به آند دیودها و منفی منبع به کاتد دیودها وصل است، دیودها هادی هستند. لذا به جای دیودها می‌توان منبع معادل ۰/۷ ولت را قرار داد. مدار معادل شکل ۱۱ــ۱ به صورت شکل ۱۲ــ۱ درمی‌آید.



شکل ۱۲ــ۱ ــ مدار معادل شکل ۱۱ــ۱

با نوشتن معادلهٔ KVL می‌توان جریان I را محاسبه نمود.

$$-E + V_D + RI = ۰$$

$$-۵/۷ + ۰/۷ + ۱I = ۰$$

$$۱I = ۵/۷ - ۰/۷ = ۵$$

$$I = \frac{۵V}{۱K\Omega} = ۵mA$$

چون دو دیود مشابه هستند :

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I}{۲} = ۲/۵mA$$

محاسبهٔ V_O :

$$V_O = RI = (۱K\Omega)(۵mA)$$

$$V_O = ۵V$$

۲ــ۱ــ الگوی پرسش

کامل کردنی

۱ــ۲ــ۱ــ ولتاژ وصل یک دیود از جنس Si حدود .... ولت و از جنس Ge حدود ..... است.

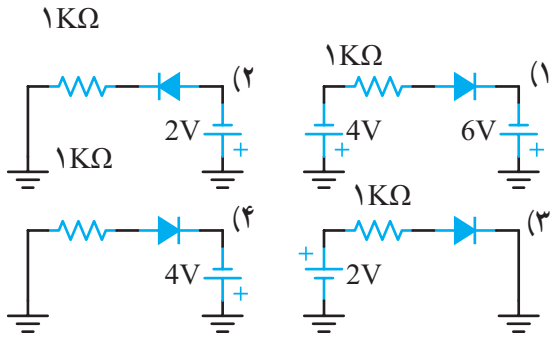
صحیح یا غلط

۲ــ۲ــ۱ــ اگر آند دیود به مثبت باتری و کاتد دیود به منفی باتری وصل شود، دیود در بایاس موافق قرار دارد.

صحیح ☐ غلط ☐

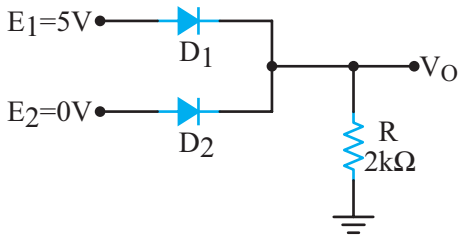
چهار گزینه‌ای

۳ــ۲ــ۱ــ کدام گزینه دیود را در حالت ایده‌آل مانند یک کلید باز نشان می دهد؟



محاسباتی

۴ــ۲ــ۱ــ در شکل ۱۳ــ۱ دیودها از جنس Si و V_γ در هر دیود برابر ۰/۷ ولت است. V_O را محاسبه کنید.

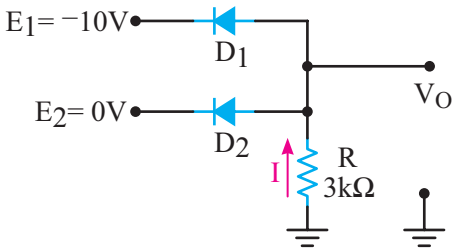


شکل ۱۳ــ۱

۵ــ۲ــ۱ــ در شکل ۱۴ــ۱ــ دیودها از جنس Si و V_γ هر دیود برابر ۰/۷ ولت است.

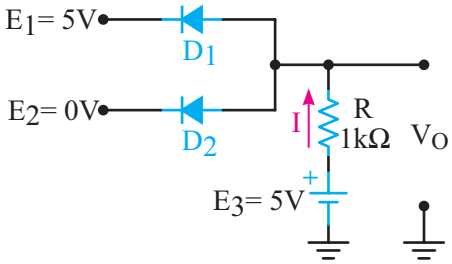
الف) کدام دیود وصل و کدام دیود قطع است؟

ب) I و V_O را محاسبه کنید.



شکل ۱۴ــ۱

۶ــ۲ــ۱ــ در شکل ۱۵ــ۱ دیودها از جنس Si و ولتاژ وصل آن‌ها V_γ=۰/۷V است. I و V_O را محاسبه کنید.



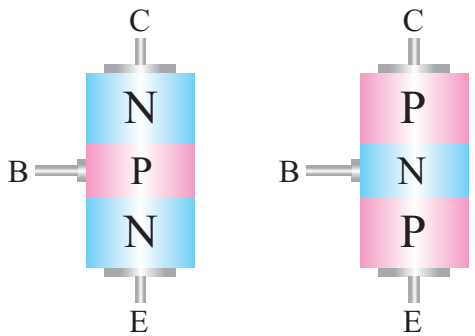
شکل ۱۵ــ۱

اجرای نرم‌افزاری

کلیهٔ موارد مندرج در این بخش را به صورت نرم‌افزاری با استفاده از کتاب آزمایشگاه مجازی (جلد دوم) شبیه سازی نمایید.

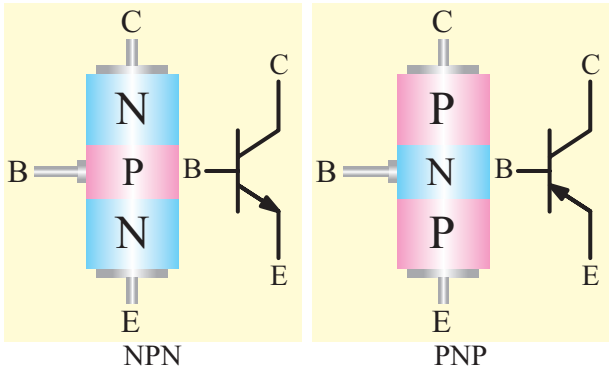
۳ــ۱ــ مروری بر ساختمان و طرز کار ترانزیستور BJT

یک ترانزیستور معمولی (BJT) از سه قطعه نیمه هادی نوع P و N تشکیل شده است. نحوهٔ قرار گرفتن کریستال‌های نیمه‌هادی به صورت شکل ۱۶ــ۱ است.



شکل ۱۶ــ۱ ــ نحوهٔ قرار گرفتن نیمه هادی‌های نوع N و P در ترانزیستور

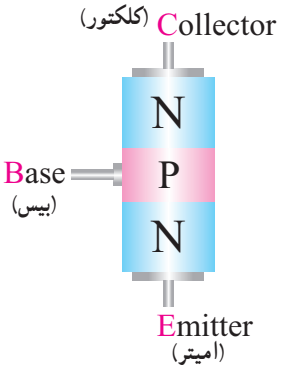
ترانزیستوری که از دو قطعه نیمه هادی نوع P و یک قطعه نیمه هادی نوع N ساخته شده است، ترانزیستور PNP و ترانزیستوری که شامل دو قطعه نیمه هادی نوع N و یک قطعه نیمه‌هادی نوع P است، ترانزیستور NPN نام دارد. شکل ۱ــ۱۷ دو نوع ترانزیستور NPN و PNP و نماد آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱ــ۱۷ــ علامت قراردادی ترانزیستورهای PNP و NPN

پایه‌های ترانزیستور را امیتر (E)، بیس (B) و کلکتور C می‌نامند.

شکل ۱ــ۱۸ نام پایه‌های ترانزیستور را نشان می‌دهد.



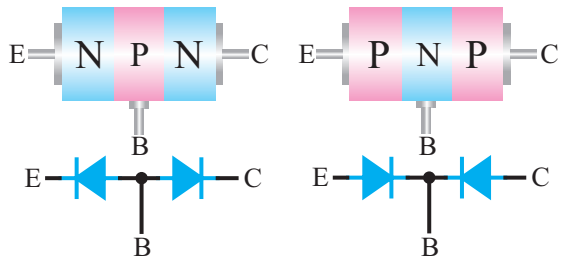
شکل ۱ــ۱۸ــ نام پایه‌های ترانزیستور

۱ــ۳ــ۱ــ معادل دیودی ترانزیستور NPN و PNP

: هر اتصال P ــ N معادل یک دیود است لذا معادل دیودی ترانزیستورهای NPN و PNP در شکل ۱ــ۱۹ رسم شده است.

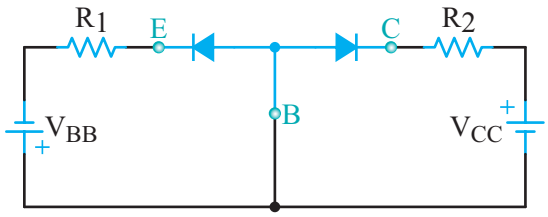
۲ــ۳ــ۱ــ نحوهٔ بایاس نمودن ترانزیستور در منطقه فعال

: در منطقه فعال لازم است دیود بیس امیتر در بایاس موافق



شکل ۱ــ۱۹ــ معادل دیودی ترانزیستور PNP و NPN

و دیود کلکتور بیس در بایاس مخالف قرار گیرد تا جریان‌ها در ترانزیستور برقرار شوند. شکل ۱ــ۲۰ــ نحوهٔ بایاس نمودن یک ترانزیستور NPN را در منطقه فعال نشان می‌دهد.



شکل ۱ــ۲۰ــ بایاس ترانزیستور NPN در منطقه فعال

۱ــ۴ــ کتاب اطلاعات (Data book) و برگهٔ اطلاعات (Data Sheet)

ترانزیستورها نیز مانند دیودها دارای مقادیر حد و مقادیر مجاز هستند که توسط کارخانهٔ سازنده تعریف می‌شود. این مقادیر معمولاً در کتاب اطلاعات (Data book) یا در برگهٔ اطلاعات (Data Sheet) درج می‌شود. کتاب و برگهٔ اطلاعات معمولاً در اختیار مصرف‌کننده قرار می‌گیرد.

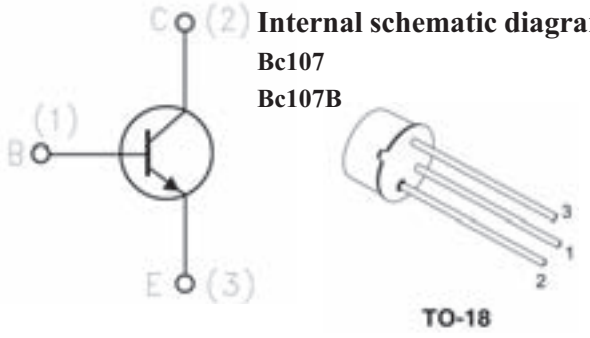
شما می‌توانید با مراجعه به سایت‌های اینترنتی از جمله www.Alldatasheet.com به انواع برگه‌های اطلاعات دسترسی پیدا نمایید. در برگهٔ اطلاعات ترانزیستورها (dataSheet) معمولاً اطلاعات مکانیکی، مشخصه‌های عمومی، مقادیر ماکزیمم مطلق، مشخصه‌های الکتریکی، منحنی‌های مشخصهٔ خروجی، ورودی و توان الکتریکی درج می‌شود.

برگهٔ اطلاعات ۱ــ۱ قسمتی از برگهٔ اطلاعات ترانزیستور BC۱۰۷ است.

Internal schematic diagram

Bc107

Bc107B



شکل ۲۱ــ۱ــ نماد و شکل ظاهری ترانزیستور BC۱۰۷

Low noise general purpose audio amplifiers

Description ترانزیستور عمومی برای تقویت‌کننده‌های صوتی با نویز کم

The BC107 and BC107B are silicon planar epitaxial NPN transistors in TO-18 metal case.

They are suitable for use in driver stages, low noise input stages and signal processing circuits of television receivers. The PNP complementary types are BC177 and BC177B respectively.

برگهٔ اطلاعات ۱ــ۱

Order codes کدهای سفارش	علامت	محفظه	بسته‌بندی
Part Number شمارهٔ قطعه	Marking	Package	Packing
BC107	BC107	TO-18	Bag
BC107A	BC107B	TO-18	Bag

قسمتی از برگهٔ اطلاعات ترانزیستور BC۱۰۷

شرح عمومی: ترانزیستور BC۱۰۷ یک ترانزیستور سیلیکونی خاص NPN است که در یک محفظهٔ فلزی ۱۸ــ TO جاسازی شده است. (شکل ۲۱ــ۱) این ترانزیستور در مدارهای طبقات میانی صوت، اولیهٔ صوت با نویزکم و در مدارهای پردازش سیگنال درگیرنده‌های تلویزیونی قابل استفاده است. ترانزیستور مکمل BC۱۰۷ ترانزیستور BC۱۷۷ است.

در برگهٔ اطلاعات ۲ــ۱ مقادیر مجاز الکتریکی ترانزیستور BC۱۰۷ را ملاحظه می‌کنید.

Electrical ratings — **BC107 - BC107B**

1 Electrical ratings

مقادیر مجاز الکتریکی

جدول ۱

Table 1. Absolute maximum rating

مقادیر بیشینهٔ مطلق

Symbol نماد	Parameter	مشخصه	Value مقدار	Unit واحد
V_{CBO}	Collector-base voltage (I_E = 0)	ولتاژ ماکزیمم CB وقتی امیتر باز است	50	V
V_{CEO}	Collector-emitter voltage (I_B = 0)	ولتاژ ماکزیمم CE وقتی بیس باز است	45	V
V_{EBO}	Emitter-base voltage (I_C = 0)	ولتاژ ماکزیمم EB وقتی کلکتور باز است	6	V
I_C	Collector current	جریان ماکزیمم مجاز کلکتور	100	mA
P_{tot}	Total dissipation at $T_{amb} \leq 25°C$	درجه حرارت محیط کم‌تر از ۲۵°C	0.3	W
	ماکزیمم تلفات توان در at $T_{case} \leq 25°C$	درجه حرارت بدنه کم‌تر از ۲۵°C	0.75	W
T_{stg}	Storage temperature	ماکزیمم درجه حرارت ذخیره در انبار	-55 to 175	°C
T_J	Max. operating junction temperature	ماکزیمم درجه حرارت محل پیوند	175	°C

جدول ۲

Table 2. Thermal data

اطلاعات حرارتی

Symbol نماد	Parameter	مشخصه	Value مقدار	Unit واحد	
$R_{thj\text{-}case}$	Thermal resistance junction-case	ماکزیمم مقاومت حرارتی پیوند به بدنه max	200	°C/W	سانتی‌گراد
$R_{thj\text{-}amb}$	Thermal resistance junction-ambient	ماکزیمم مقاومت حرارتی پیوند با محیط max	500	°C/W	

برگه اطلاعات ۲ــ۱ مقادیر ماکزیمم مجاز الکتریکی

نکته بسیار مهم : لازم است هنگام طرح سؤال از data sheet حتماً جداول، اعداد و نوشته‌های موجود در data sheet به زبان انگلیسی در اختیار هنرجویان قرار گیرد.

در برگهٔ اطلاعات ۳ــ۱ قسمتی از مشخصه‌های الکتریکی ترانزیستور BC۱۰۷ را در حرارت بدنهٔ ۲۵ درجه سانتی‌گراد ملاحظه می‌کنید. درجه حرارت‌های غیر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد ذکر می‌شود.

BC107 - BC107B — Electrical characteristics

2 Electrical characteristics — مشخصه‌های الکتریکی

(T_{CASE} = 25°C; unless otherwise specified) — درجه حرارت برابر با ۲۵ درجهٔ‌سانتی‌گراد است در غیر این صورت ذکر می‌شود

Table 3. Electrical characteristics — مشخصه‌های الکتریکی

Symbol نماد	Parameter مشخصه	Test Conditions شرایط آزمایش	Min. حداقل	Typ. متعارف	Max. بیشینه	Unit واحد
I_{CBO}	Collector cut-off current جریان قطع کلکتور	V_{CB} = 40V			15	nA
$V_{(BR)CBO}$	Collector-base breakdown voltage (I_E = 0) ولتاژ شکست CB	I_C = 10μA	50			V
$V_{(BR)CEO}$	Collector-emitter breakdown voltage (I_B = 0) ولتاژ شکست CE	I_C = 10mA	45			V
$V_{(BR)EBO}$	Emitter-base breakdown voltage (I_C = 0) ولتاژ شکست EB	I_E = 10μA	6			V

برگهٔ اطلاعات ۳ــ۱ــ قسمتی از مشخصات الکتریکی ترانزیستور BC۱۰۷

در برگهٔ اطلاعات ۴ــ۱ قسمت دیگری از مشخصات الکتریکی ترانزیستور BC۱۰۷ شامل $V_{CE(sat)}$، $V_{BE(sat)}$، $V_{BE(on)}$، h_{FE}، h_{fe}، C_{CBO}، C_{EBO}، hie (r_π)، hoe ($\frac{1}{R_O}$) را ملاحظه می‌کنید.

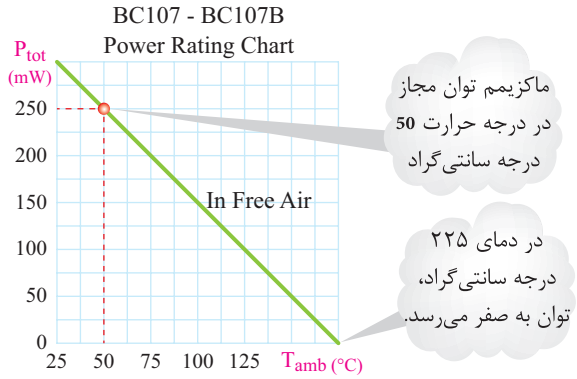
			MIN	TYP	Max	Unit
$V_{CE(sat)}$ (1)	Collector-emitter saturation voltage ولتاژ اشباع CE	I_C = 10mA I_B = 0.5mA		70	250	mV
$V_{BE(sat)}$ (1)	Base-emitter saturation voltage ولتاژ اشباع BE	I_C = 10mA I_B = 0.5mA		750		mV
$V_{BE(on)}$ (1)	Base-emitter on voltage ولتاژ هدایت BE	I_C = 2mA V_{CE} = 5V	550	650	700	mV
h_{FE}	DC current gain مقدار بهرهٔ جریان DC (h_{FE} در شرایط DC)	I_C = 2mA V_{CE} = 5V	110		450	
h_{fe}	Small signal current gain مقدار بهرهٔ جریان سیگنال کوچک (h_{fe} در شرایط AC)	I_C = 2mA V_{CE} = 5V f = 1kHz		250		
C_{CBO}	Collector-base capacitance ظرفیت خازنی CB	I_E = 0 V_{CB} = 10V f = 1MHz		4	6	pF
C_{EBO}	Emitter-base capacitance ظرفیت خازنی EB	I_C = 0 V_{EB} = 0.5V f = 1MHz		12		pF
h_{ie}	Input impedance (rπ) امپدانس ورودی	I_C = 2mA V_{CE} = 5V f = 1kHz		4 4.8		kΩ kΩ
h_{oe}	Output admittance هدایت خروجی ($\frac{1}{R_O}$)	I_C = 2mA V_{CE} = 5V f = 1kHz		30		μS

در حالت پالس : پریود یا دورهٔ تناوب پالس ۳۰۰ میکروثانیه، دوام پالس کم‌تر یا مساوی یک درصد
(1) pulse duration=300μs. duty cycle ≤1٪

برگهٔ اطلاعات ۴ــ۱ــ تعداد دیگری از مشخصه‌های الکتریکی ترانزیستور BC۱۰۷

علاوه بر مشخصات الکتریکی، تعدادی از منحنی مشخصه‌های ترانزیستور نیز در برگهٔ اطلاعات داده می‌شود. یکی از این مشخصه‌ها که بسیار اهمیت دارد، مشخصهٔ تغییرات توان ماکزیمم مجاز برحسب درجهٔ حرارت است. در نمودار شکل ۱ــ۲۲ مشخصهٔ تغییرات توان مجاز را با افزایش درجه حرارت برای ترانزیستور BC۱۰۷ در هوای آزاد مشاهده می‌کنید.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در صورتی که درجهٔ حرارت محیط برابر با ۲۵ درجه سانتی‌گراد باشد، ماکزیمم توان مجاز برابر با ۳۰۰ میلی‌وات است. در صورتی که درجه حرارت به ۵۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد، میزان توان مجاز به ۲۵۰ میلی‌وات کاهش می‌یابد. در ۲۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد، توان ماکزیمم مجاز ترانزیستور BC۱۰۷ به صفر خواهد رسید.



نمودار شکل ۲۲ــ۱ــ تغییرات توان ماکزیمم مجاز ترانزیستور BC۱۰۷ نسبت به تغییرات درجهٔ حرارت

تمرین کلاسی: مقدار توان ماکزیمم را در درجه حرارت‌های ۶۲/۵، ۸۷/۵، ۱۰۰ و ۱۱۲/۵ درجه سانتی‌گراد محاسبه کنید. نقطه‌های موردنظر را با رنگ دیگری روی نمودار شکل ۲۲ــ۱ مشخص نمایید.

۵ــ۱ــ تقسیم بندی ترانزیستورها بر اساس پارامترهای آن

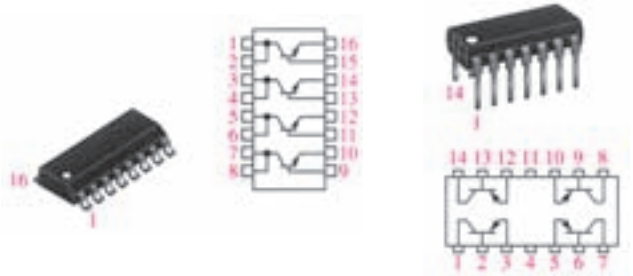
اگر به اطلاعات نوشته شده در برگهٔ اطلاعات ترانزیستورها توجه شود، مشاهده می‌گردد برخی مشخصات مانند I_{cmax}، V_{CEmax}، P_{cmax}، فرکانس حد و فرکانس قطع آن‌ها با هم متفاوت است. ترانزیستورها بر اساس این پارامترها (مشخصه‌ها) و نوع کاربرد، در دسته‌بندی‌های متعددی قرار می‌گیرند. مثلاً ترانزیستورها از نظر فرکانس به سه دستهٔ فرکانس کم (LF =Low Frequency)، فرکانس متوسط (MF=Medium Frequency) و فرکانس زیاد (HF=High Frequency) تقسیم‌بندی می‌شوند. این موضوع برای تقویت سیگنال از نظر ولتاژ، جریان و توان نیز صدق می‌کند. تقسیم‌بندی‌های دیگری نیز وجود دارد که به دلیل محدودیت زمانی نمی‌توان به آن‌ها پرداخت. در ادامه به توضیح مختصری در مورد برخی از انواع تقسیم‌بندی‌ها که در مباحث بعدی کاربرد دارند، می‌پردازیم.

۱ــ۵ــ۱ــ ترانزیستور کاربرد عمومی و سیگنال کوچک

General Purpose / small signal Transistor : این ترانزیستورها برای تقویت سیگنال‌های با ولتاژ و جریان با دامنه کم به کار می‌روند و معمولاً در تقویت‌کننده‌های قدرت پایین یا متوسط یا برای مدارهای کلیدی به کار می‌روند. بدنهٔ این ترانزیستورها معمولاً پلاستیکی یا فلزی است و حداکثر توان مجاز آن‌ها معمولاً از ۵۰۰ میلی وات تجاوز نمی‌کند. در شکل ۲۳ــ۱ شکل ظاهری چند نمونه از این ترانزیستورها را مشاهده می‌کنید.

(ب) (الف)

پ) ترانزیستور در بستهٔ دوتایی ت) ترانزیستور با بسته‌بندی TO ۱۸



ث) چهار ترانزیستور در یک بسته‌بندی به صورت DIPIC [۱] ج) چهار ترانزیستور در بسته‌بندی نصب سطحی

شکل ۲۳ــ۱ــ انواع ترانزیستورهای عمومی

۱ــ Dual in line package integrated circuit

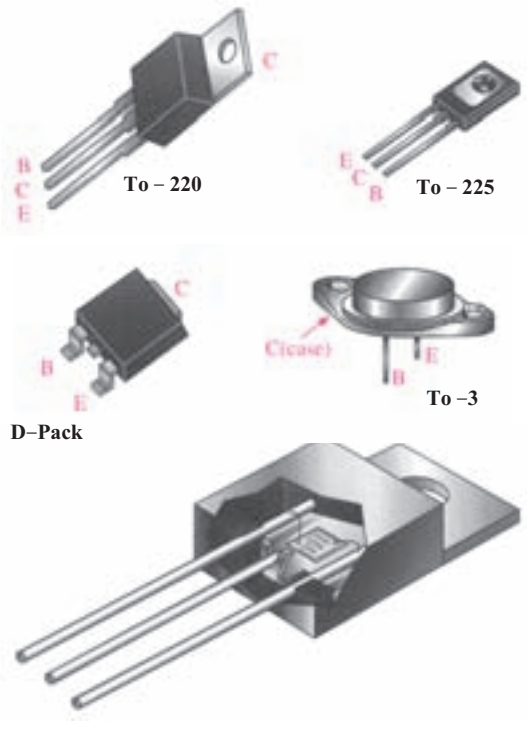
۲ــ۵ــ۱ــ ترانزیستورهای قدرت

PowerTransistors : این ترانزیستورها قادر به تقویت سیگنال‌های با ولتاژ و جریان با دامنهٔ زیاد هستند و معمولاً در تقویت‌کننده‌های سیگنال بزرگ به کار می‌روند. حداکثر توان مجاز این ترانزیستورها از ۵۰۰ میلی‌وات تا چند ده وات است.

بدنهٔ این ترانزیستورها که معمولاً فلزی است، به کلکتور اتصال دارد تا بتواند با محیط تبادل حرارت نماید.

در توان‌های زیاد، بدنه به گرماگیر (هیت سینک) اتصال داده می‌شود.

در شکل ۲۴ــ۱ شکل ظاهری چند نمونه ترانزیستور قدرت را مشاهده می‌کنید.



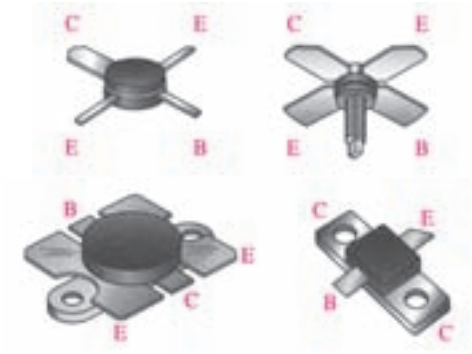
شکل ۲۴ــ۱ــ چند نمونه ترانزیستور قدرت

۳ــ۵ــ۱ــ ترانزیستورهای فرکانس بالا

High Frequency Transistors : این ترانزیستورها به تغییر ولتاژ و شدت جریان ورودی خود که فرکانس فوق‌العاده زیاد دارند، به سرعت پاسخ می‌دهند.

مقدار فرکانس قطع این ترانزیستورها چندین مگاهرتز تا گیگاهرتز است.

در شکل ۲۵ــ۱ چند نمونه ترانزیستور فرکانس بالا را مشاهده می‌کنید.



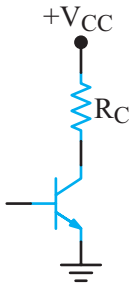
شکل ۲۵ــ۱ــ چند نمونه ترانزیستور فرکانس بالا

برای دانش‌آموزان علاقه‌مند:

تحقیق کنید چرا در ترانزیستورهای فرکانس بالا پایه مشترک ترانزیستور بیش از یکی پیش‌بینی شده است.

۴ــ۵ــ۱ــ فوتوترانزیستور (Photo Transistor)

: اگر مطابق شکل ۲۶ــ۱ بیس ترانزیستوری باز باشد. جریان ضعیفی در اتصال دیود کلکتور بیس که در بایاس مخالف قرار دارد، ایجاد می‌شود. این جریان که ناشی از حامل‌های اقلیت بوده و در اثر حرارت ایجاد شده است، جریان اشباع معکوس یا جریان نشتی نام دارد.



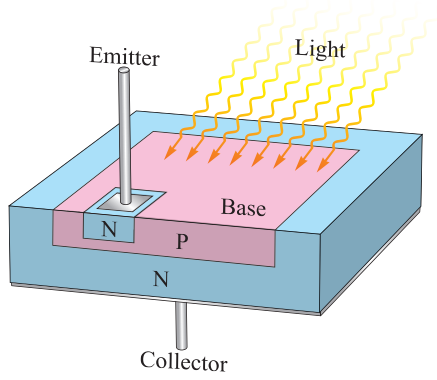
شکل ۲۶ــ۱ــ ایجاد جریان نشتی در ترانزیستور

به علت آزاد بودن بیس، تمام جریان اشباع معکوس از بیس عبور نموده و در کلکتور جریان $I_C = \beta_{DC} I_B$ را ایجاد می‌نماید. اتصال P ــ N کلکتور بیس که در بایاس مخالف قرار دارد علاوه بر حساس بودن به حرارت ، به نور نیز حساس است.

در ترانزیستور نوری، نور از طریق یک دریچه، به اتصال کلکتور بیس برخورد می‌کند و جریان نشتی را افزایش می‌دهد و در نتیجه جریان I_C افزایش می‌یابد.

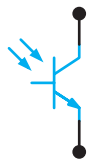
به این ترتیب نور به تغییر جریان الکتریکی تبدیل می‌شود. این پدیده اساس کار فوتوترانزیستور را تشکیل می‌دهد.

در شکل ۲۷ــ۱ ساختمان کریستالی فوتوترانزیستور را مشاهده می‌کنید.



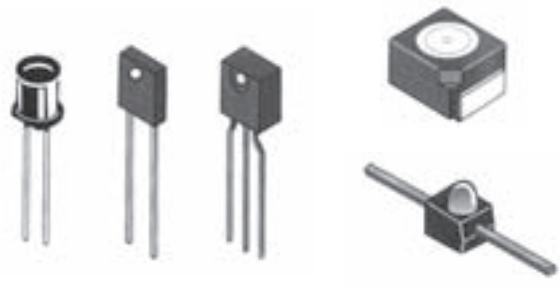
شکل ۲۷ــ۱ــ ساختمان کریستالی فوتوترانزیستور

نماد فوتوترانزیستور در شکل ۲۸ــ۱ رسم شده است.



شکل ۲۸ــ۱ــ نماد فوتوترانزیستور

در شکل ۲۹ــ۱ چند نمونه شکل ظاهری فوتوترانزیستور نشان داده شده است.



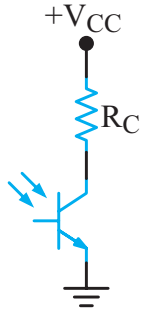
شکل ۲۹ــ۱ــ چند نمونه فوتوترانزیستور

مشاهده می‌شود فوتوترانزیستور به صورت دو پایه و سه پایه عرضه می‌گردد.

در نوع دو پایه، پایه بیس در دسترس نیست، ولی در نوع سه پایه، پایه‌های امیتر، بیس و کلکتور در دسترس قرار دارند.

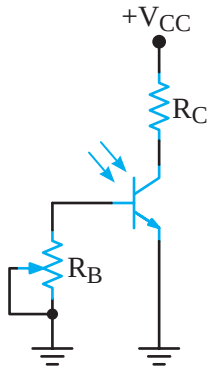
● ***بایاس نمودن فتو ترانزیستور:***

روش معمول استفاده از فوتوترانزیستور به صورت شکل ۳۰ــ۱ است.



شکل ۳۰ــ۱ــ بایاس فوتوترانزیستور

می‌توان مطابق شکل ۳۱ــ۱ مقاومت متغیری را در بیس ترانزیستور قرار داد و میزان حساسیت مدار را تنظیم نمود. البته استفاده از مدار بدون R_B متداول‌تر است.



شکل ۳۱ــ۱ــ مقاومت تنظیم حساسیت در فوتوترانزیستور

انواع دیگر ترانزیستور، مانند ترانزیستور کلیدزنی (Switching)، ترانزیستور با مقاومت سری با بیس، ترانزیستور با دیود و ...وجود دارد که در صورت نیاز در مبحث مربوطه به توضیح در مورد آن‌ها خواهیم پرداخت.

۶ ــ۱ــ الگوی پرسش

کامل کردنی

۱ــ۶ ــ۱ــ برای بایاس ترانزیستور در منطقهٔ فعال دیود بیس امیتر در بایاس ..... و دیود کلکتور بیس در بایاس .... قرار می‌گیرد.

صحیح یا غلط

۲ــ ۶ ــ۱ــ با توجه به برگهٔ اطلاعات شماره ۲ــ۱، جریان ماکزیمم مجاز کلکتور ترانزیستور BC۱۰۷ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد ۳۰۰mA است.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ــ۶ــ۱ــ Collector Emitter Break down Voltage به مفهوم ولتاژ شکست کلکتور ــ امیتر ($V_{(BR)\,CEO}$) است.

صحیح ☐ غلط ☐

کامل کردنی

۴ــ۶ــ۱ــ با توجه به برگهٔ اطلاعات شمارهٔ ۳ــ۱ ترانزیستور BC۱۰۷، در شرایط آزمایش با جریان I_C برابر با ..... میلی‌آمپر، $V_{(BR)\,CEO}$ حداقل برابر ..... ولت است.

۵ــ۶ــ ۱ــ با توجه به شکل نمودار ۲۲ــ۱ در دمای ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد ماکزیمم توان مجاز ترانزیستور BC۱۰۷ برابر..... میلی‌وات است.

چهار گزینه‌ای

۶ــ۶ــ۱ــترانزیستورهای با حداکثر توان از ۵۰۰ میلی‌وات به بالا جزء کدام دسته از ترانزیستورها هستند؟

۱) سیگنال کوچک (Small Signal)

۲) قدرت (Power)

۳) فرکانس بالا (HF)

۴) فرکانس پایین (LF)

تشریحی

۷ــ۶ــ۱ــ نحوهٔ بایاس کردن فوتوترانزیستور را با رسم شکل شرح دهید .

۷ــ۱ــ روش‌های مختلف بایاس کردن ترانزیستور

در مورد انواع روش‌های بایاس نمودن ترانزیستور در کتاب الکترونیک (۱) توضیح داده شده است. ضمن یادآوری مدار سه نوع بایاس ترانزیستور یعنی بایاس ثابت، بایاس اتوماتیک و بایاس سرخود، سعی می‌شود با حل چند نمونه مسئله، نحوهٔ نوشتن معادله KVL و محاسبه جریان‌ها و ولتاژها در این سه نوع بایاس، تمرین داده شود تا به مهارت لازم برسید.

۱ــ۷ــ۱ــ بایاس ثابت با دو باتری : در شکل ۳۲ــ۱ مدار بایاس ثابت با دو باتری رسم شده است.

$V_B = V_{BE}$

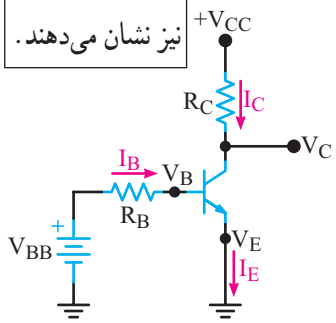
$I_B = \dfrac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$

h_{FE} را با β یا β_{DC} نیز نشان می‌دهند.

$I_C = \beta_{DC} I_B$

$V_E = 0$

$V_C = V_{CC} - R_C I_C$



شکل ۳۲ــ۱ــ بایاس ثابت با دو باتری

باتری V_{BB} دیود بیس امیتر ترانزیستور را در بایاس موافق قرار می‌دهد. باتری V_{CC} دیود کلکتور بیس را در بایاس مخالف قرار می‌دهد تا به این ترتیب ترانزیستور در منطقه فعال بایاس شود. به منظور کنترل جریان بیس از مقاومت R_B و برای کنترل جریان کلکتور از مقاومت R_C استفاده شده است.

روابط جریان‌ها و ولتاژها در این بایاس به صورت زیر است :

$I_B = \dfrac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$ محاسبهٔ I_B

$I_C = \beta_{DC} I_B$ محاسبهٔ I_C

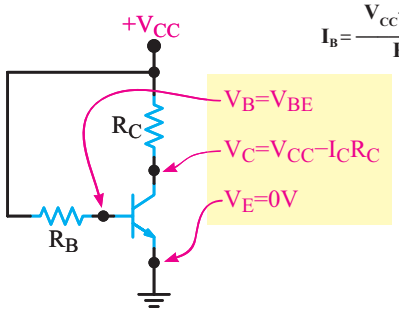
$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$ محاسبهٔ V_{CE}

۲ــ۷ــ۱ــ بایاس ثابت با یک باتری : در شکل ۳۳ــ۱ این بایاس و روابط لازم برای محاسبه جریان‌ها و ولتاژها در آن نشان داده شده است.

$I_C=\beta_{DC}I_B$

$I_E=I_C+I_B$

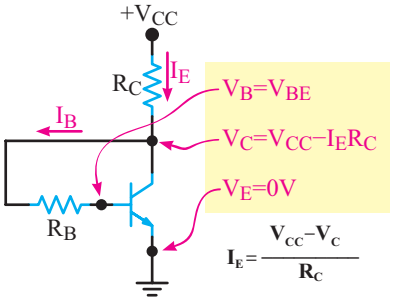
$I_B=\frac{V_{CC}-V_{BE}}{R_B}$



شکل ۳۳ــ۱ــ بایاس ثابت با یک باتری

۳ــ۷ــ۱ــ بایاس اتوماتیک (خودکار) : شکل ۳۴ــ۱

بایاس اتوماتیک و روابط مربوط به آن را نشان می‌دهد.



$I_E=\frac{V_{CC}-V_C}{R_C}$

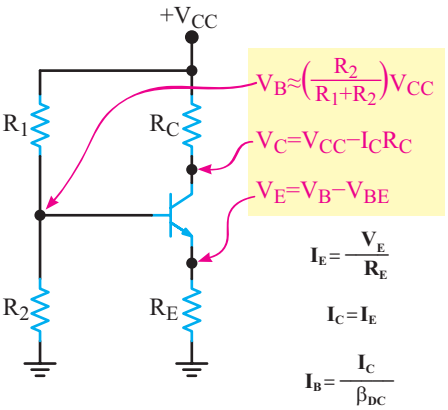
$I_E=I_C+I_B$

$I_B=\frac{V_C-V_{BE}}{R_B}$

شکل ۳۴ــ۱ــ بایاس اتوماتیک

۴ــ۷ــ۱ــ بایاس سرخود :

مدار بایاس سرخود و روابط مربوط به محاسبهٔ ولتاژ پایه‌ها و جریان پایه‌های آن را در شکل ۳۵ــ۱ مشاهده می‌کنید.



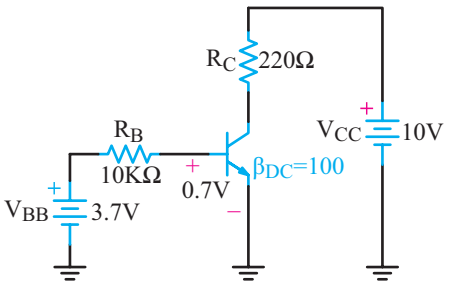
$I_E=\frac{V_E}{R_E}$

$I_C=I_E$

$I_B=\frac{I_C}{\beta_{DC}}$

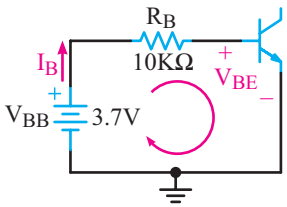
شکل ۳۵ــ۱ــ بایاس سرخود

مثال ۴ــ۱ : با توجه به شکل ۳۶ــ۱ و مقادیر داده شده در مدار، I_B، I_C و V_{CE} را محاسبه کنید.



شکل ۳۶ــ۱

پاسخ : با نوشتن معادله KVL در حلقه ورودی I_B را می‌توان محاسبه نمود. حلقه ورودی معادل شکل ۳۷ــ۱ است.



شکل ۳۷ــ۱ــ حلقهٔ ورودی

معادلهٔ حلقه ورودی

$-V_{BB}+R_BI_B+V_{BE}=0$

محاسبهٔ I_B

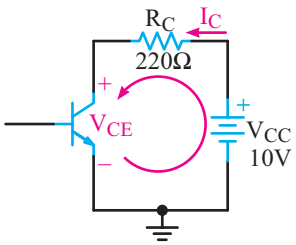
$I_B=\frac{V_{BB}-V_{BE}}{R_B}$

$I_B=\frac{3/7-0/7}{10}=\boxed{0/3mA}$

چون $I_C=\beta_{DC}I_B$ است لذا

$I_C=100\times 0/3=\boxed{30mA}$

با نوشتن معادلهٔ KVL در حلقهٔ خروجی می‌توان V_{CE} را محاسبه نمود. شکل ۳۸ــ۱ حلقهٔ خروجی را نشان می‌دهد.



شکل ۳۸ــ۱ــ حلقهٔ خروجی

معادلهٔ حلقه خروجی

$$-V_{CC}+R_CI_C+V_{CE}=0$$

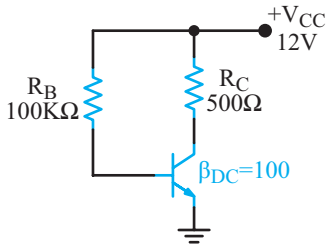
محاسبهٔ V_{CE}

$$V_{CE}=V_{CC}-R_CI_C$$

$$V_{CE}=10-(0/22)(30)$$

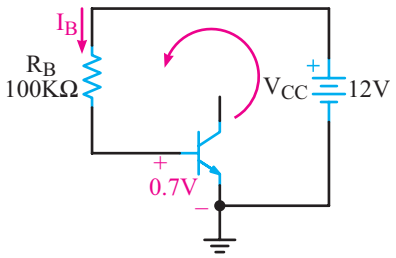
$$\boxed{V_{CE}=3/4V}$$

مثال ۵ ــ ۱ : با توجه به شکل ۳۹ــ۱ و مقادیر داده شده در مدار، I_B، I_C و V_{CE} را محاسبه کنید. $V_{BE}=0/7V$



شکل ۳۹ــ۱

پاسخ : با نوشتن معادله KVL در حلقهٔ خروجی و ورودی مطابق شکل ۴۰ــ۱ می‌توان I_B را محاسبه نمود.



شکل ۴۰ــ۱

معادلهٔ KVL در حلقه خروجی و ورودی

$$-V_{CC}+R_BI_B+V_{BE}=0$$

محاسبهٔ I_B :

$$I_B=\frac{V_{CC}-V_{BE}}{R_B}$$

$$I_B=\frac{12-0/7}{100K\Omega}=\frac{11/3}{100}mA$$

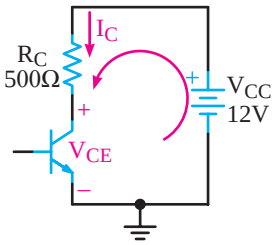
$$\boxed{I_B=113\mu A}$$

محاسبهٔ I_C :

$$I_C=\beta_{DC}I_B$$

$$I_C=\frac{11/3}{100}\times 100=11/3mA$$

با نوشتن معادلهٔ KVL در حلقهٔ خروجی در شکل ۴۱ــ۱ می‌توان V_{CE} را محاسبه نمود.



شکل ۴۱ــ۱ــ حلقهٔ خروجی

معادلهٔ KVL در حلقهٔ خروجی :

$$-V_{CC}+R_CI_C+V_{CE}=0$$

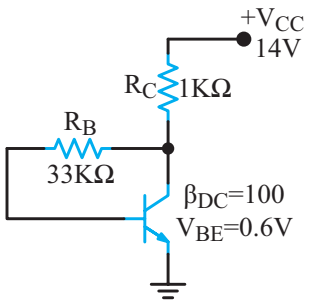
$$V_{CE}=V_{CC}-R_CI_C$$

در معادله عددگذاری نموده و V_{CE} را محاسبه می‌کنیم.

$$V_{CE}=12-(0/5K\Omega)(11/3mA)$$

$$V_{CE}=6/35V$$

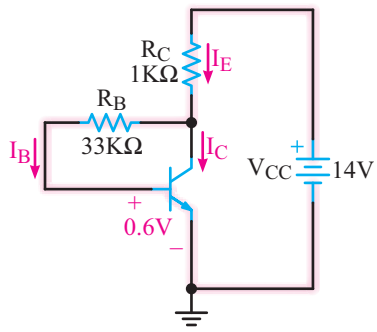
مثال ۶ ــ ۱ : با توجه به شکل ۴۲ــ۱ و مقادیر داده شده در مدار، I_B، I_C و V_{CE} را محاسبه کنید.



شکل ۴۲ــ۱

پاسخ : با توجه به اینکه $I_C=\beta I_B$ و $I_E=(1+\beta)I_B$ است، جریان امیتر ترانزیستور بر حسب I_B محاسبه می‌گردد.

با نوشتن معادله KVL در حلقه نشان داده شده در شکل ۴۳ــ۱، I_B به دست می‌آید.



شکل ۴۳ــ۱

محاسبهٔ جریان I_C و I_E بر حسب I_B :

$I_C=۱۰۰I_B$

$I_E=۱۰۱I_B$

معادلهٔ KVL در حلقهٔ خروجی و ورودی :

$-V_{CC}+R_CI_E+R_BI_B+V_{BE}=۰$

جایگزینی اعداد در معادله و محاسبهٔ I_B :

$-۱۴+۱(۱۰۱I_B)+۳۳I_B+۰/۶=۰$

$۱۳۴I_B=۱۴-۰/۶=۱۳/۴$

$I_B=\frac{۱۳/۴}{۱۳۴}=۰/۱mA$

محاسبهٔ I_C :

$I_C=\beta I_B=۱۰۰\times۰/۱=۱۰mA$

محاسبهٔ I_E :

$I_E=I_C+I_B=۱۰/۱\ mA$

معادلهٔ KVL در حلقهٔ خروجی برای محاسبه V_{CE} :

$-V_{CC}+R_CI_E+V_{CE}=۰$

محاسبهٔ V_{CE} :

$V_{CE}=V_{CC}-R_CI_E$

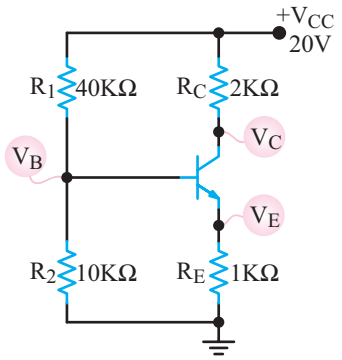
$V_{CE}=۱۴-(۱)(۱۰/۱)=۳/۹V$

مثال ۷ــ۱ : در شکل ۴۴ــ۱ با فرض $I_E\simeq I_C$ ولتاژ پایه‌ها و جریان پایه‌های ترانزیستور را محاسبه کنید.

$V_{BE}=۰/۷$ ولت

پاسخ : محاسبهٔ V_B بر اساس تقسیم ولتاژ V_{CC} روی مقاومت‌های $R_۲$ و $R_۱$:

$V_B=\frac{V_{CC}R_۲}{R_۱+R_۲}$



شکل ۴۴ــ۱

$V_B=\frac{۲۰\times۱۰}{۱۰+۴۰}=۴V$

محاسبهٔ V_E :

$V_E=V_B-V_{BE}$

$V_E=(۴)-(۰/۷)=۳/۳V$

محاسبهٔ I_E :

$I_E=\frac{V_E}{R_E}=\frac{۳/۳}{۱K}=۳/۳mA$

محاسبهٔ I_C :

$I_C\simeq I_E=۳/۳mA$

محاسبهٔ V_C :

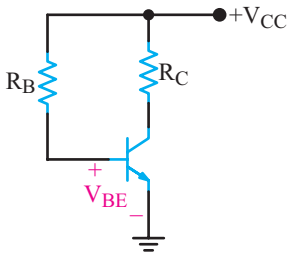
$V_C=V_{CC}-R_CI_C$

$V_C=۲۰-۲\times۳/۳$

$V_C=۱۳/۴V$

۸ــ۱ــ الگوی پرسش کامل کردنی

۱ــ۸ــ۱ــ در مدار شکل ۴۵ــ۱ I_B از رابطهٔ $I_B=\frac{V_{CC}-\cdots\cdots}{\cdots\cdots}$ به دست می‌آید.

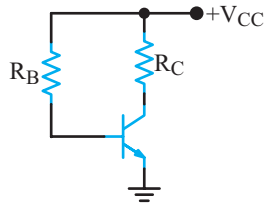


شکل ۴۵ــ۱

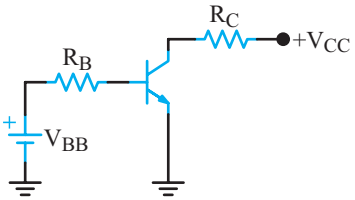
چهار گزینه‌ای

۲ــ۸ ــ ۱ــ مدار بایاس اتوماتیک کدام گزینه است؟

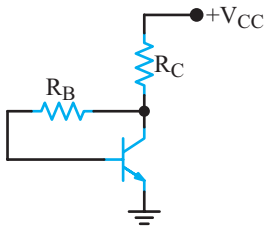
۱)



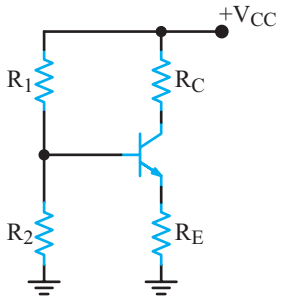
۲)



۳)

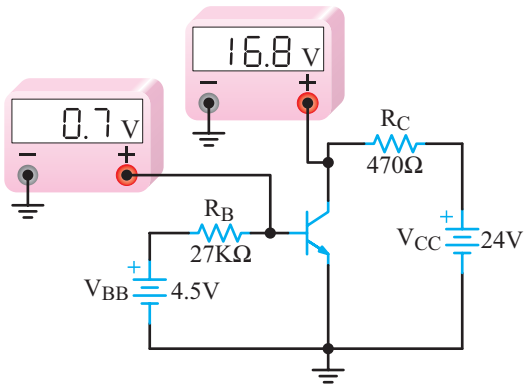


۴)



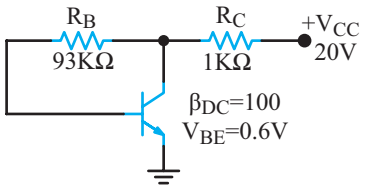
محاسباتی

۳ــ۸ــ۱ــ β_{DC} را در مدار شکل ۱ــ۴۶ محاسبه کنید.



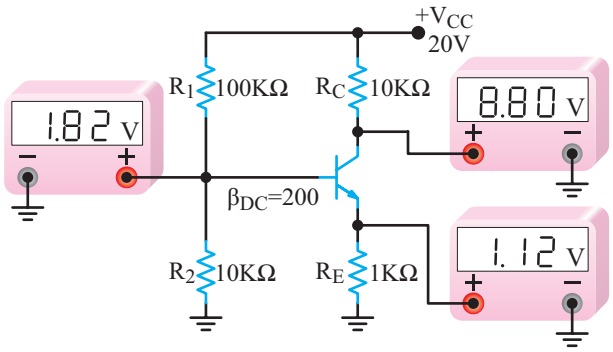
شکل ۱ــ۴۶

۴ــ۸ــ۱ــ مقادیر نقطهٔ کار (I_B، I_C و V_{CE}) را برای مدار شکل ۱ــ۴۷ محاسبه کنید.



شکل ۱ــ۴۷

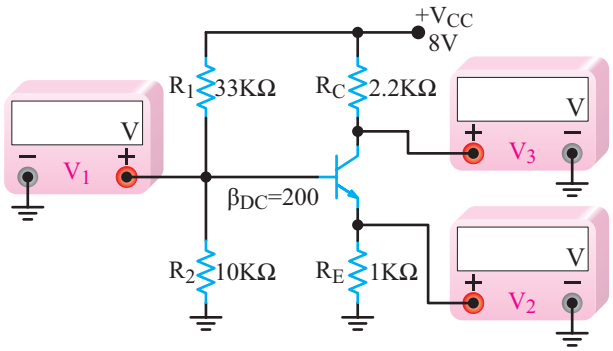
۵ــ۸ــ۱ــ با استفاده از روابط مربوط به بایاس سرخود اثبات کنید که مقادیر نشان داده شده توسط ولت‌مترهای شکل ۱ــ۴۸ صحیح است. V_{BE}=۰/۷V



شکل ۱ــ۴۸

۶ــ۸ــ۱ــ مقادیری که ولت‌مترهای V_1 و V_2 و V_3 در مدار شکل ۱ــ۴۹ باید نشان دهند را محاسبه کنید.

V_{BE} را ۰/۷ ولت در نظر بگیرید.



شکل ۱ــ۴۹

۹ــ۱ــ منحنی‌های مشخصهٔ ترانزیستور

روابط بین جریان‌ها و ولتاژها و تغییرات آن‌ها در ترانزیستور و هم‌چنین ضریب تقویت به عواملی چون درجهٔ حرارت، فرکانس و غیر خطّی بودن المان‌ها بستگی دارد. منظور از غیر خطّی بودن، این است که نسبت تغییرات جریان‌ها و ولتاژها تابع یک معادلهٔ خطی ریاضی نیست. معمولاً از طریق ریاضی به سادگی نمی‌توان مقادیر را به دست آورد. بنابراین، از منحنی‌هایی که بیان‌کنندهٔ روابط بین جریان‌ها و ولتاژها است، استفاده می‌شود.

این منحنی‌ها عبارت‌اند از :

الف) منحنی مشخّصهٔ ورودی

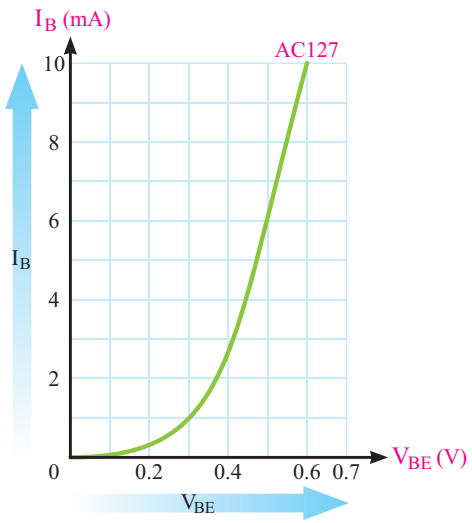
ب) منحنی مشخّصهٔ انتقالی

پ) منحنی مشخّصهٔ خروجی

در یک ترانزیستور، منحنی‌های مشخّصهٔ دیگری نیز وجود دارد که در آینده مورد بحث قرار می‌گیرند. در ادامهٔ بحث، دربارهٔ هر یک از سه منحنی ذکر شده توضیحاتی خواهیم داد. البته این منحنی‌ها برای آرایش امیتر مشترک ترسیم شده‌اند.

۱ــ۹ــ۱ــ منحنی مشخّصهٔ ورودی ترانزیستور

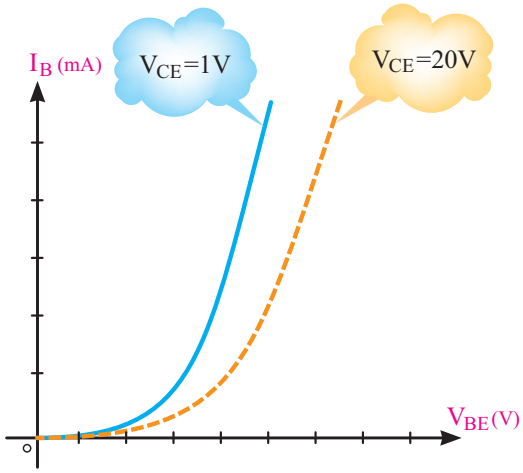
یا منحنی‌های بیس امیتر : در شکل ۱ــ۵۰ منحنی مشخصهٔ ورودی ترانزیستور AC۱۲۷ در حالت امیتر مشترک نشان داده شده است. این ترانزیستور از جنس ژرمانیم است و به همین دلیل، جریان بیس نسبتاً زیادی دارد.



شکل ۱ــ۵۰ــ منحنی ورودی ترانزیستور AC۱۲۷

منحنی مشخّصهٔ ورودی ترانزیستور، بیان‌کنندهٔ مقدار جریان ورودی بر حسب ولتاژ ورودی است. چون مدار ورودی به یک دیود شباهت دارد، منحنی مشخّصهٔ آن نیز شبیه منحنی مشخّصهٔ ولت ــ آمپر دیود معمولی است.

باید توجه داشت که منحنی مشخّصهٔ ورودی به ازای یک ولتاژ معیّن V_{CE} رسم می‌شود. اگر V_{CE} تغییر کند، منحنی نیز کمی تغییر می‌کند. البتّه این تغییرات بسیار جزئی هستند و در اکثر موارد می‌توان از آن‌ها صرف‌نظر کرد. مقدار ولتاژ V_{CE} را که به ازای آن منحنی مشخّصهٔ ورودی رسم شده است، کارخانهٔ سازنده مشخّص می‌نماید. در شکل ۱ــ۵۱ منحنی مشخّصهٔ ورودی ترانزیستور به ازای V_{CE} =۱ V و V_{CE} = ۲۰ V نشان داده شده است.



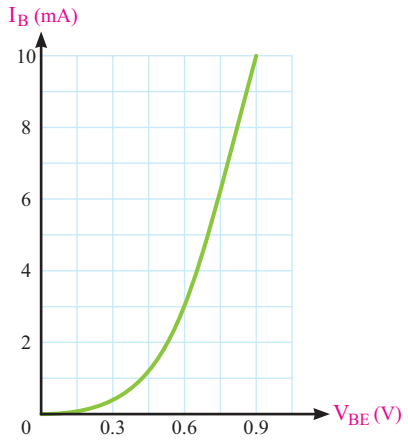
شکل ۱ــ۵۱ــ منحنی مشخّصهٔ ورودی ترانزیستور به ازای مقادیر مختلف V_{CE}

● ***اطلاعات قابل استخراج از منحنی مشخصهٔ ورودی :***

از منحنی مشخصه ورودی اطلاعات زیر را می‌توان استخراج نمود.

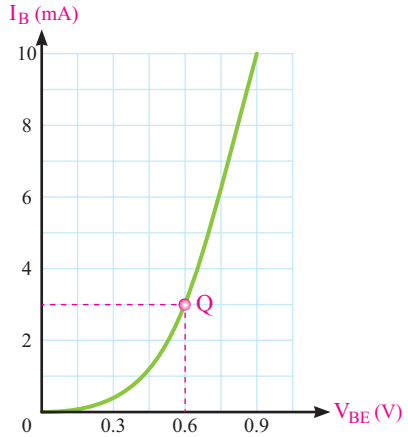
الف) نقطه کار ورودی : به ازای یک V_{CE} معین با معلوم بودن هر یک از کمیت‌های V_{BE} یا I_B از روی منحنی، نقطهٔ کار ورودی مشخص می‌شود.

مثال ۱ــ۸ : در شکل ۱ــ۵۲ به ازای ولتاژ V_{BE} =۰/۶ V مختصات نقطهٔ کار ورودی را مشخص کنید.



شکل ۵۲ــ۱

پاسخ : اگر مطابق شکل ۵۳ ــ۱ از نقطهٔ $V_{BE} = ۰/۶$ ولت خطی بر محور V_{BE} عمود کنیم، منحنی را در نقطهٔ Q قطع می‌کند، از نقطهٔ Q خطی بر محور I_B عمود می‌کنیم، محل تلاقی این خط با محور I_B، مقدار I_B را در نقطهٔ کار مشخص می‌کند.



شکل ۵۳ــ۱

ورودی Q $\begin{cases} V_{BE} = ۰/۶ \text{ ولت} \\ I_B = ۳m_A \end{cases}$

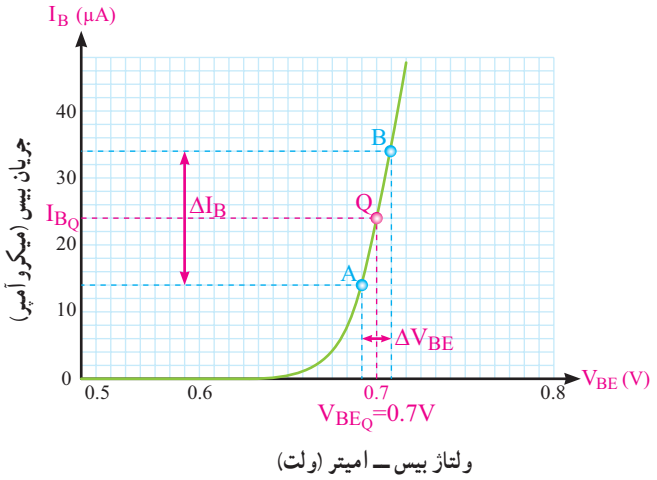
ب) مقاومت استاتیک و دینامیک دیود بیس/امیتر :

اگر سیگنالی متناوب به بیس ترانزیستور اعمال کنیم، تغییر دامنهٔ این سیگنال موجب آن می‌شود که افت پتانسیل دو سر پیوند بیس ــ امیتر، حول نقطهٔ کار Q قدری تغییر کند. میزان این تغییرات در مقایسه با ولتاژ بایاس V_{BEQ} خیلی کم است؛ مثلاً اگر $V_{BEQ}=۰/۷$ ولت فرض شود، ممکن است این تغییرات بین دو مقدار ۰/۶۹ V و ۰/۷۱ V در نوسان باشد. تغییرات ولتاژ V_{BE} باعث تغییرات جریان بیس ترانزیستور خواهد شد. طبق تعریف، مقاومت دینامیکی دیود بیس امیتر با نسبت تغییرات ولتاژ بیس امیتر به تغییرات جریان بیس ترانزیستور برابر است. مقاومت دینامیکی دیود بیس امیتر را با r_π نشان می‌دهند.

$$r_\pi = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}$$

این مقاومت برابر عکس شیب خط مماس بر منحنی مشخصهٔ ورودی ترانزیستور در نطقهٔ کار آن است. در حالت بدون سیگنال V_i ، نقطهٔ کار Q ثابت است. در این حالت، طبق تعریف مقاومت استاتیک دیود بیس ــ امیتر برابر با $R_s = \frac{V_{BEQ}}{I_{BQ}}$ است .

در شکل ۵۴ــ۱ یک منحنی مشخصهٔ ورودی نمونه نشان داده شده است.



شکل ۵۴ــ۱ــ منحنی مشخصهٔ ورودی ترانزیستور و چگونگی تغییرات نقطهٔ کار

مثال ۹ــ۱ : با توجه به منحنی ۵۴ــ۱

الف) مختصات نقطهٔ کار DC را در نقطه Q بنویسید.

ب) مقاومت استاتیکی دیود بیس امیتر را در نقطهٔ کار Q به دست آورید.

پ) اگر در اثر اعمال سیگنال متناوب نقطهٔ کار از A تا B تغییر کند، مقاومت دینامیکی را از A تا B به دست آورید.

پاسخ : با مراجعه به مثال ۸ــ۱ و با توجه به شکل ۵۴ــ۱ مقادیر مختصات نقطهٔ کار Q را به دست می‌آوریم.

مختصات نقطهٔ کار Q با استفاده از مختصات $\begin{cases} V_{BEQ} = ۰/۷V \\ I_{BQ} = ۲۴\,\mu A \end{cases}$ به دست آمده، مقاومت استاتیکی را محاسبه می‌کنیم.

$$\text{مقاومت استاتیکی } R_S = \frac{V_{BEQ}}{I_{BQ}} = \frac{۰/۷V}{۲۴\mu A} = ۲۹/۱۶K\Omega$$

با مراجعه به منحنی شکل ۵۴ــ۱ مختصات کار نقاط A و B را به دست می‌آوریم.

$$A\begin{cases} V_{BE} = ۰/۶۹V \\ I_B = ۱۴\mu A \end{cases}$$

$$B\begin{cases} V_{BE} = ۰/۷۱V \\ I_B = ۳۴\mu A \end{cases}$$

$$\text{(مقاومت دینامیکی) } r_\pi = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{V_{BE(B)} - V_{BE(A)}}{I_{B(B)} - I_{B(A)}}$$

$$r_\pi = \frac{۰/۷۱ - ۰/۶۹}{(۳۴ - ۱۴)\mu A} = \frac{۰/۰۲}{۲۰ \times ۱۰^{-۶}} = ۱K\Omega$$

توجّه داشته باشید که مقاومت ورودی دینامیکی ترانزیستور ممکن است با تغییر نقطهٔ کار به مقدار زیادی تغییر کند. برای این که در سیگنال ورودی تغییر شکل به وجود نیاید، باید نقطهٔ کار طوری انتخاب شود که تغییرات آن همواره در قسمت خطّی منحنی ورودی یعنی ناحیهٔ A تا B در شکل ۵۴ــ۱ باقی بماند.

پ) قابلیت هدایت انتقالی ترانزیستور: در ترانزیستور نسبت $\frac{\beta}{r_\pi}$ را قابلیت هدایت انتقالی می‌گویند و آن را با g_m نشان می‌دهند. در دمای طبیعی g_m برابر است با :

$$g_m = \frac{I_C}{۲۶mV} \approx \frac{I_E}{۲۶mV}$$

۲۶mV ولتاژ حرارتی در دمای ۳۰۰ درجهٔ کلوین است و آن را با V_T نمایش می‌دهند. از g_m برای طراحی مدارهای تقویت‌کننده استفاده می‌شود.

مثال ۱۰ــ۱ : اگر I_{CQ}=۱۳mA باشد هدایت انتقالی ترانزیستور را به دست آورید. (در دمای محیط)

پاسخ :

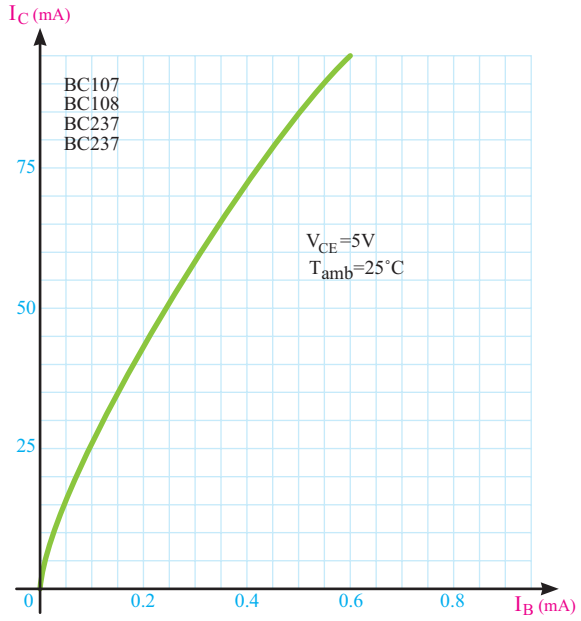
$$g_m = \frac{I_C}{۲۶mV} = \frac{۱۳mA}{۲۶mV}$$

g_m = ۰/۵ (زیمنس S یا $\frac{۱}{\Omega}$)

آیا می دانید: امروزه از ترانزیستورهای تکی (جداگانه Discrete) کم‌تر استفاده می‌شود و اگر هم استفاده شود به صورت نصب سطحی (SMD) است.

۲ــ۹ــ۱ــ منحنی مشخّصهٔ انتقالی ترانزیستور :

مشخّصهٔ انتقالی، رابطهٔ بین جریان ورودی و جریان خروجی ترانزیستور را به ازای مقادیر ثابت V_{CE} نشان می‌دهد. در شکل ۵۵ــ۱ منحنی مشخّصهٔ انتقالی ترانزیستور BC۱۰۷ را به ازای V_{CE}=۵V مشاهده می‌کنید.



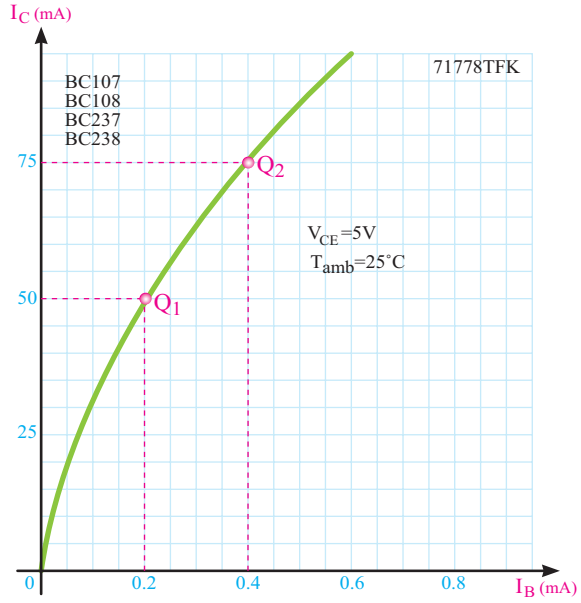
شکل ۵۵ــ۱ــ منحنی مشخّصهٔ انتقالی ترانزیستور BC۱۰۷ با V_{CE} = ۵V

از منحنی مشخصهٔ انتقالی ترانزیستور می‌توان β_{DC} و β_{ac} یا hfe را به دست آورد.

$$\beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B}\Big|_{V_{CE}} \quad \text{ثابت}$$

$$\beta_{ac} = hfe = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\Big|_{V_{CE}} \quad \text{ثابت}$$

مثال ۱۱ــ۱ : با توجه به منحنی شکل ۵۶ــ۱ در نقطهٔ کار $Q_۱$ مقدار β_{DC} و از نقطهٔ کار $Q_۱$ تا نقطهٔ کار $Q_۲$ مقدار β_{ac} را به دست آورید.



شکل ۵۶ــ۱

پاسخ : مختصات نقطهٔ Q_1 و Q_2 را بر اساس آن چه که قبلاً گفته شد از روی منحنی به دست می‌آوریم.

$$Q_1 \begin{cases} I_B = ۰/۲\text{mA} \\ I_C = ۵۰\text{mA} \end{cases}$$

$$Q_2 \begin{cases} I_B = ۰/۴\text{mA} \\ I_C = ۷۵\text{mA} \end{cases}$$

مقدار β_{DC} در نقطهٔ Q_1 برابر است با

$$\beta_{DC} = \frac{I_{C1}}{I_{B1}} = \frac{۵۰\,\text{mA}}{۰/۲\,\text{mA}} = ۲۵۰$$ مرتبه

برای به دست آوردن β_{AC} مقادیر ΔI_C و ΔI_B را از روی منحنی تعیین می کنیم.

$$\Delta I_C = ۷۵ - ۵۰ = ۲۵\text{mA}$$

$$\Delta I_B = ۰/۴ - ۰/۲ = ۰/۲\text{mA}$$

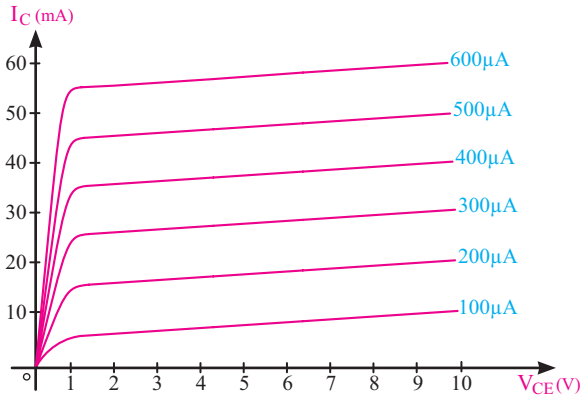
مقدار hfe را محاسبه می کنیم.

$$hfe = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{۲۵\,\text{mA}}{۰/۲\,\text{mA}}$$

$$hfe = \frac{۲۵۰}{۲} = ۱۲۵$$ مرتبه

۳ــ۹ــ۱ــ منحنی‌های مشخّصهٔ خروجی ترانزیستور :
منحنی مشخّصهٔ خروجی ترانزیستور، رابطهٔ بین جریان و ولتاژ خروجی را به ازای جریان ورودی معیّن نشان می‌دهد. اگر تقویت کننده امیتر مشترک باشد، جریان ورودی I_B و جریان خروجی I_c و ولتاژ خروجی V_{CE} خواهد بود (تقریباً همهٔ کارخانه‌های سازندهٔ ترانزیستور را در حالت امیتر مشترک ارائه می‌دهند).

شکل ۵۷ــ۱ منحنی مشخّصهٔ خروجی ترانزیستور و نواحی کار آن را به ازای یک جریان I_B ثابت نشان می‌دهد.



شکل ۵۷ــ۱ــ منحنی‌های مشخصهٔ خروجی

مقدار جریان خروجی (I_c)، تابع دو عامل I_B و V_{CE} است؛ یعنی، با کم و زیاد شدن I_B جریان خروجی (I_C) نیز کم یا زیاد می‌شود. این مطلب در مورد V_{CE} نیز صدق می‌کند لیکن تأثیر تغییرات V_{CE} بر I_c ناچیز و در مواردی قابل اغماض است. از طرفی جریان I_B به V_{BE} نیز بستگی دارد.

● ***اطلاعات قابل استخراج از منحنی‌های مشخصهٔ خروجی :***

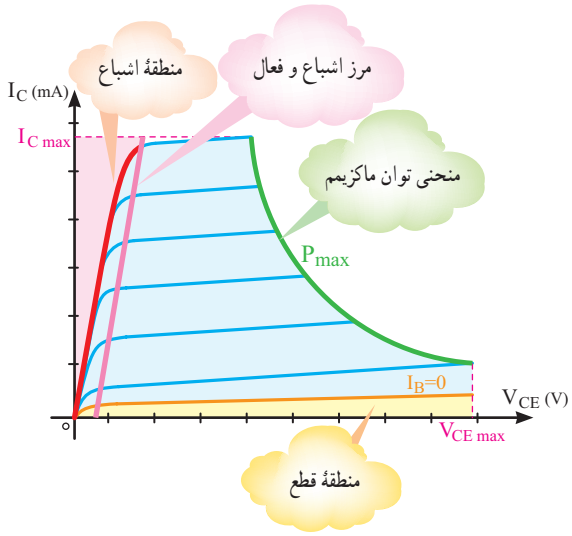
از منحنی‌های مشخصه خروجی ترانزیستور اطلاعات زیر را می‌توان استخراج نمود.

الف) نقطه کار ب) جریان نشتی

پ) بهره جریان ت) امپدانس (مقاومت) خروجی ترانزیستور

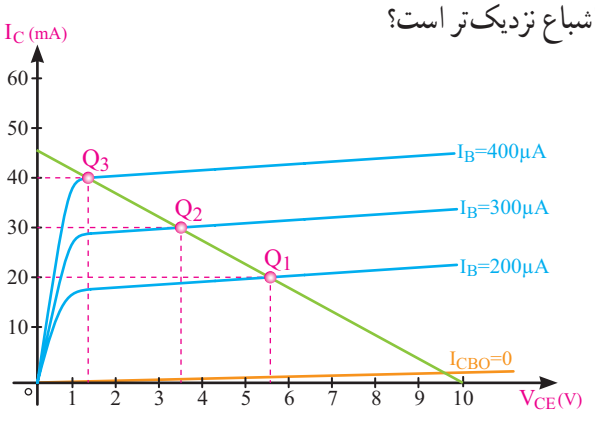
الف) نقطهٔ کار Q (Quicent Point) : برای انتخاب نقطهٔ کار، ابتدا باید محدودیت‌های ترانزیستور را در نظر گرفت. از جملهٔ این محدودیت‌ها، تحمّل توان تلف شده در ترانزیستور، حداکثر جریان کلکتور و حداکثر ولتاژ بین کلکتور و امیتر است. از آن جا که تلفات توان توسط ترانزیستور برابر

$P_T = V_{CE} \cdot I_C + V_{BE} \cdot I_B$ است (یادآوری می‌شود که مقدار $V_{BE} \cdot I_B$ کم است و معمولاً از آن صرف‌نظر می‌کنند)؛ لذا نقطهٔ کار باید در محلّی قرار گیرد که حاصل‌ضرب $V_{CE} \cdot I_C$ مساوی یا کم‌تر از ماکزیمم توان قابل تحمّل ترانزیستور باشد. منحنی تغییرات $V_{CE} \cdot I_C$ در شکل ۵۸ــ۱ آمده است. هم‌چنین محل نقطهٔ کار نباید در محل $I_B = ۰$ (منطقهٔ قطع) باشد (در منطقهٔ قطع جریان ورودی ترانزیستور برابر صفر است). درضمن، نقطهٔ کار باید در محلّی قرار گیرد که بتواند سیگنال را از دو طرف به یک اندازه تقویت کند. در شکل ۵۸ــ۱ منطقهٔ قطع، منطقهٔ اشباع و منحنی توان ماکزیمم نشان داده شده است.



شکل ۵۸ــ۱ــ منحنی مشخصهٔ خروجی و منحنی توان ماکزیمم

مثال ۱۲ــ۱ : با توجه به منحنی شکل ۵۹ــ۱ مختصات نقطهٔ کار Q_1 و Q_2 و Q_3 را بنویسید. کدام نقطهٔ کار به ناحیهٔ اشباع نزدیک‌تر است؟



شکل ۵۹ــ۱

پاسخ : مختصات نقاط کار Q_1 و Q_2 و Q_3 را از روی منحنی به دست می‌آوریم.

مختصات نقطهٔ کار Q_1 : $\begin{cases} V_{CE} = ۵/۶V \\ I_C = ۲۰mA \\ I_B = ۲۰۰\mu A \end{cases}$

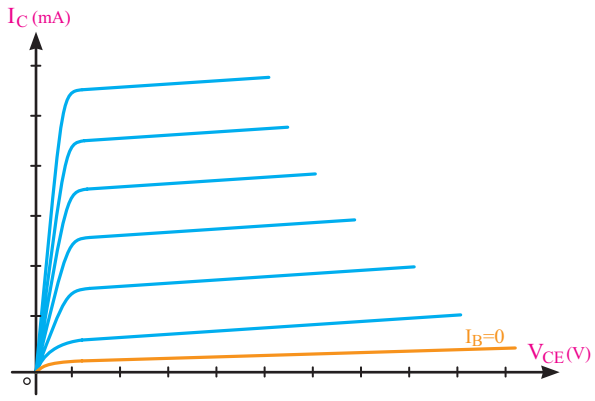
مختصات نقطهٔ کار Q_2 : $\begin{cases} V_{CE} = ۳/۵V \\ I_C = ۳۰mA \\ I_B = ۳۰۰\mu A \end{cases}$

مختصات نقطهٔ کار Q_3 : $\begin{cases} V_{CE} = ۱/۲V \\ I_C = ۴۰mA \\ I_B = ۴۰۰\mu A \end{cases}$

با توجه به این که در نقطهٔ کار Q_3 مقدار V_{CE} در مقایسه با نقاط کار Q_1 و Q_2 کم‌تر و I_C آن بیش‌تر است لذا نقطهٔ Q_3 به ناحیهٔ اشباع نزدیک‌تر است.

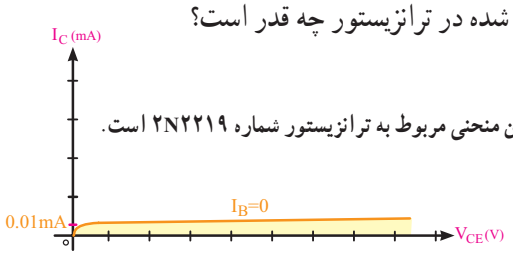
ب) جریان نشتی: به شکل ۶۰ــ۱ توجه کنید. در این شکل اولین منحنی به ازای جریان بیس صفر ($I_B=۰$) رسم شده است. اگر جریان نشتی وجود نداشته باشد این منحنی باید روی خط V_{CE} (محور افقی) قرار گیرد زیرا $I_C = \beta I_B = \beta(۰) = ۰$ است .

همان طور که مشاهده می‌شود به علت وجود جریان نشتی، در I_B برابر صفر جریان I_C وجود دارد. این جریان، جریان نشتی تقویت شده است که از کلکتور عبور می‌کند. مقدار این جریان نشتی از رابطهٔ $I_C = (۱+\beta) I_{CO}$ به دست می‌آید.



شکل ۶۰ــ۱ــ منحنی مشخصهٔ خروجی

مثال ۱۳ــ۱ : با توجه به شکل ۶۱ــ۱ جریان نشتی تقویت شده در ترانزیستور چه قدر است؟



شکل ۶۱ــ۱ــ منحنی مشخصهٔ خروجی به ازای بزرگ‌تر

پاسخ : با توجه به شکل ۶۱ ــ۱ به ازای I_B برابر صفر جریان I_C برابر است با :

$$I_C = ۰/۰۱mA = ۱۰\mu A$$

این جریان، جریان نشتی تقویت شده است که از کلکتور می‌گذرد.

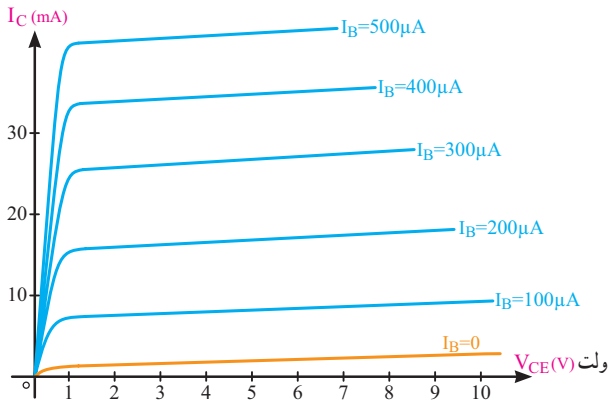
پ) بهرهٔ جریان : بهرهٔ جریان معمولاً در دو حالت استاتیک (β_{DC}) و دینامیک ($\beta_{ac} = hfe$) بیان می‌شود که قبلاً در مورد آن‌ها توضیح داده شده است و از روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$\beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B}\Big|_{V_{CE}} \quad \text{ثابت}$$

$$\beta_{ac} = hfe = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\Big|_{V_{CE}} \quad \text{ثابت}$$

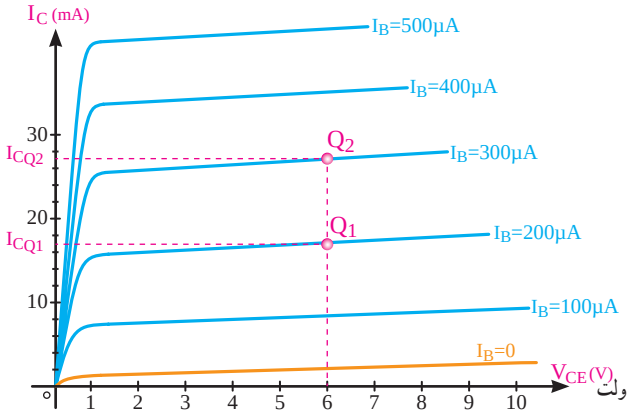
از روی منحنی‌های مشخصهٔ خروجی ترانزیستور می‌توان ضریب تقویت جریان را نیز به دست آورد.

مثال ۱۴ــ۱ : با استفاده از منحنی شکل ۶۲ــ۱ به ازای V_{CE} ثابت ۶ ولت و I_B=۲۰۰μA، β_{DC} را محاسبه کنید. اگر I_B از ۲۰۰ میکروآمپر تا ۳۰۰ میکروآمپر تغییر کند، hfe چه قدر است؟



شکل ۶۲ــ۱ــ منحنی مشخصهٔ خروجی

پاسخ : مطابق شکل ۶۳ــ۱ از نقطهٔ V_{CE}=۶ ولت روی محور افقی خطی بر آن عمود می‌کنیم تا منحنی I_B=۲۰۰μA را در نقطهٔ $Q_۱$ و منحنی I_B=۳۰۰μA را در نقطهٔ $Q_۲$ قطع کند. از نقطهٔ $Q_۱$ و $Q_۲$ خطی بر محور عمودی (محور I_C) عمود می‌کنیم. محل تلاقی این خط با محور I_C، نقاط $I_{CQ۱}$ و $I_{CQ۲}$ را نشان می‌دهد.



شکل ۶۳ــ۱

$$\text{مختصات } Q_۱ \begin{cases} I_{CQ۱} = ۱۷mA \\ I_{BQ۱} = ۲۰۰\mu A = ۰/۲mA \end{cases}$$

از روی مختصات $Q_۱$ مقدار β_{DC} را محاسبه می‌کنیم.

$$\beta_{DC} = \frac{I_{CQ۱}}{I_{BQ۱}} = \frac{۱۷mA}{۰/۲mA} = ۸۵ \quad \text{مرتبه}$$

مختصات نقطهٔ $Q_۲$ را برای محاسبهٔ β_{AC} به دست می‌آوریم.

$$\text{مختصات } Q_۲ \begin{cases} I_{CQ۲} = ۲۷mA \\ I_{BQ۲} = ۳۰۰\mu A = ۰/۳mA \end{cases}$$

مقدار ΔI_C و ΔI_B را محاسبه می‌کنیم.

$$\Delta I_C = I_{CQ۲} - I_{CQ۱} = ۲۷ - ۱۷ = ۱۰mA$$

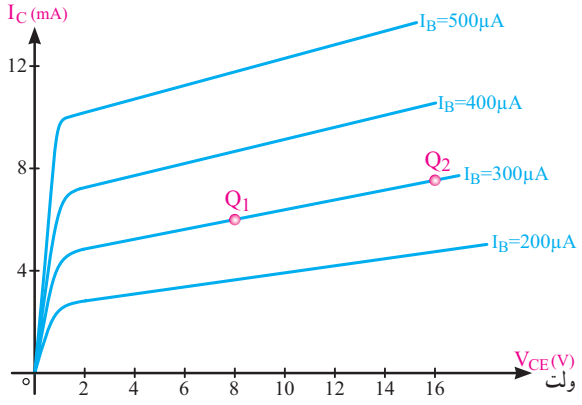
$$\Delta I_B = I_{BQ۲} - I_{BQ۱} = ۰/۳ - ۰/۲ = ۰/۱mA$$

با استفاده از ΔI_B و ΔI_C مقدار hfe را به دست می‌آوریم.

$$hfe = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{۱۰mA}{۰/۱mA} = ۱۰۰ \quad \text{مرتبه}$$

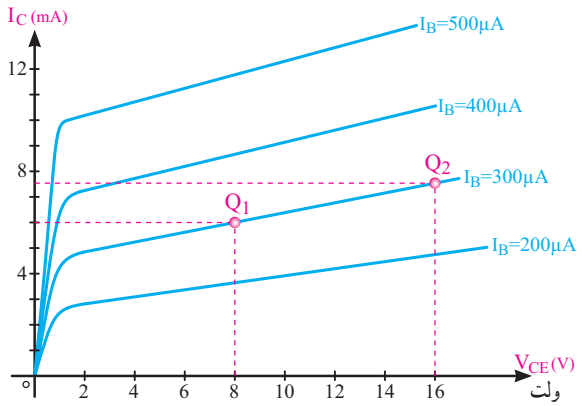
ت) مقاومت خروجی ترانزیستور: مقاومت خروجی ترانزیستور، مقاومت کلکتور امیتر ترانزیستور در نقطهٔ کار مشخص شده است و از رابطهٔ : ثابت I_B | $R_{OCE}=\frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C}$ به دست می‌آید. مقاومت خروجی ترانزیستور در داخل ترانزیستور قرار داشته و با مقاومت بار کاملاً متفاوت است.

مثال ۱۵ــ۱ : با توجه به شکل ۶۴ــ۱ از روی منحنی $I_B=۳۰۰\mu A$، اگر نقطهٔ کار از $Q_۱$ تا $Q_۲$ تغییر کند، مقاومت خروجی ترانزیستور را محاسبه کنید.



شکل ۶۴ــ۱ــ منحنی مشخصهٔ خروجی

پاسخ : مطابق شکل ۶۵ ــ۱ از نقاط $Q_۱$ و $Q_۲$ دو خط بر محور V_{CE} و I_C عمود می‌کنیم، مقادیر V_{CE} و I_C را روی محورها می‌خوانیم.



شکل ۶۵ــ۱

$$Q_۱ \text{ مختصات } \begin{cases} V_{CEQ۱}=۸V \\ I_{CQ۱}=۶mA \end{cases}$$

$$Q_۲ \text{ مختصات } \begin{cases} V_{CEQ۲}=۱۶V \\ I_{CQ۲}=۷/۵mA \end{cases}$$

با محاسبهٔ ΔV_{CE} و ΔI_C ، R_O محاسبه می‌شود.

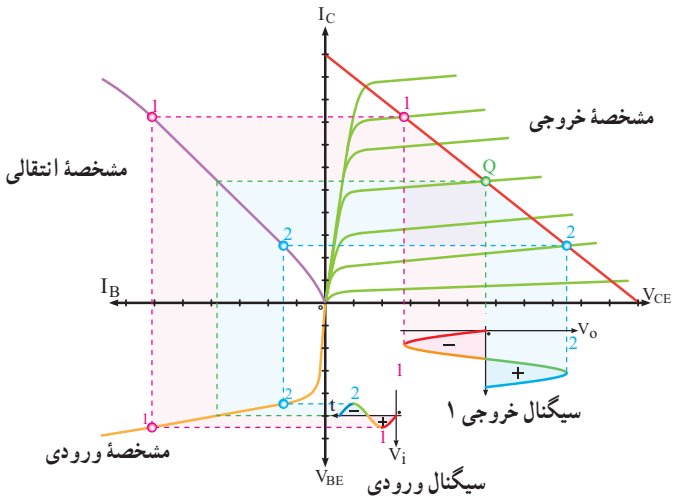
$$\Delta V_{CE}=V_{CEQ۲}-V_{CEQ۱}$$
$$\Delta V_{CE}=۱۶-۸=۸V$$
$$\Delta I_C=I_{CQ۲}-I_{CQ۱}$$
$$\Delta I_C=۷/۵-۶=۱/۵mA$$
$$R_O=\frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C}=\frac{۸V}{۱/۵mA}$$
$$R_O=۵/۳۳K\Omega$$

۱۰ــ۱ــ بررسی تقویت سیگنال الکتریکی از روی منحنی‌های مشخّصهٔ ترانزیستور

برای درک چگونگی تقویت سیگنال، از روی منحنی‌های مشخّصهٔ ورودی، انتقالی و خروجی با توجّه به نقطهٔ کار و خط بار به مطالب زیر توجّه کنید.

همان طور که قبلاً گفتیم، سیگنال ورودی به بیس ــ امیتر داده می‌شود؛ بنابراین، ولتاژ V_{BE} یک ولتاژ متغیر حول نقطهٔ کار ورودی خواهد شد. با تغییرات V_{BE}، I_B نیز تغییر می‌کند.

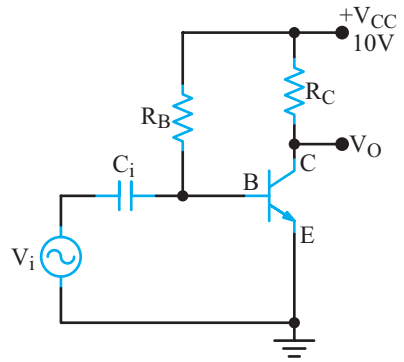
تغییرات I_B سبب تغییرات I_C می‌شود و تغییرات I_C ، تغییرات V_{CE} را به دنبال دارد که خروجی تقویت‌کننده است. در شکل ۶۶ــ۱ مراحل تقویت را مشاهده می‌کنید.



شکل ۶۶ــ۱ــ نحوهٔ تقویت سیگنال متناوب روی منحنی‌های مشخصه

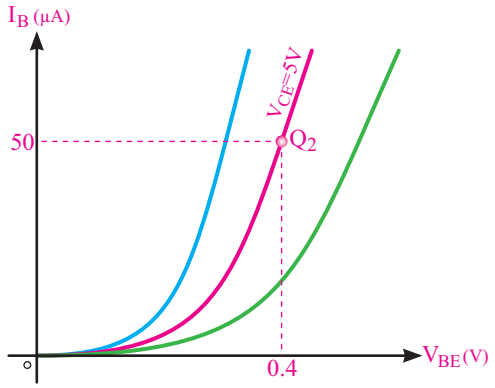
همان‌طور که می‌بینید، در نیم سیکل مثبت، زمانی که ولتاژ اضافه می‌شود (۱) دامنهٔ سیگنال خروجی (V_{CE}) کاهش می‌یابد. لذا بین سیگنال ورودی و خروجی یک اختلاف فاز ۱۸۰ درجه به وجود می‌آید. برای بررسی دقیق چگونگی تقویت، بحث را با یک مثال عددی پی می‌گیریم.

مثال ۱۶ــ۱ : به مدار تقویت‌کنندهٔ شکل ۶۷ــ۱ توجه کنید. در این مدار می‌خواهیم چگونگی تقویت‌کنندگی را نشان دهیم.



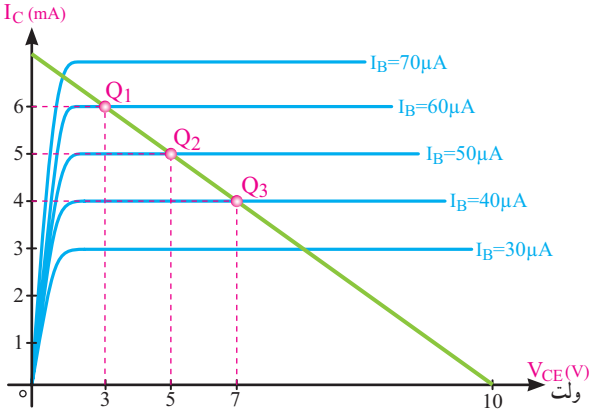
شکل ۶۷ــ۱ مدار تقویت‌کننده

فرض کنید مقادیر R_B و R_C طوری انتخاب شده باشند که نقطهٔ کار ترانزیستور در روی منحنی مشخصهٔ ورودی شکل ۶۸ــ۱ در نقطهٔ Q_2 قرار گرفته باشد.



شکل ۶۸ــ۱ منحنی مشخصهٔ ورودی

مختصات نقطهٔ کار Q_2 در روی منحنی مشخصهٔ خروجی در شکل ۶۹ــ۱ نشان داده شده است.

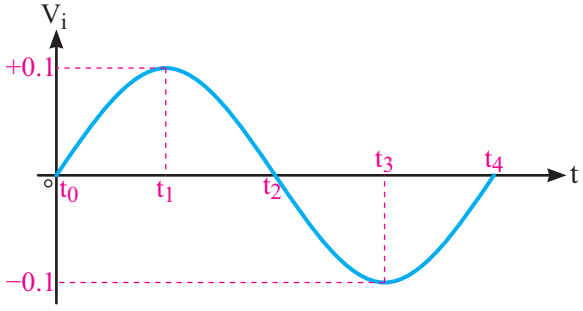


شکل ۶۹ــ۱ مختصات نقطهٔ کار Q_2

از روی منحنی‌ها مختصات کامل نقطهٔ کار Q_2 را استخراج می‌کنیم، نتیجه خواهد شد :

$$Q_2 \begin{cases} V_{CE} = 5V \\ I_C = 5mA \\ I_B = 50\mu A \\ V_{BE} = 0/4V \end{cases}$$

اکنون ولتاژ متناوب سینوسی با دامنهٔ ۰/۱ ولت را به ورودی مدار اعمال می‌کنیم و به بررسی وضع ترانزیستور در هر حالت می‌پردازیم. شکل ۷۰ــ۱ این موج و دامنهٔ آن را در لحظات مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۷۰ــ۱ موج متناوب سینوسی

در هر لحظه می‌توان نوشت :

$V_{be} = V_i + V_{BE}$

V_{BE}= ولتاژ بیس امیتر در نقطهٔ کار DC

V_{be}= ولتاژ لحظه‌ای بیس امیتر

در لحظهٔ t_0 ولتاژ متناوب ورودی برابر صفر است لذا $V_{be} = 0 + 0/4 = 0/4$ V نقطهٔ کار Q_2 تغییری نمی‌کند. در

لحظهٔ t_1 دامنهٔ ولتاژ متناوب سینوسی برابر ۰/۱ ولت است لذا $V_{be}=۰/۱+۰/۴=۰/۵$ V با افزایش V_{be}، I_B افزایش یافته و نقطهٔ کار از Q_2 به نقطهٔ Q_1 انتقال می‌یابد. در لحظهٔ t_2، $V_i=۰$ و $V_{be}=۰/۴$ V و نقطهٔ کار به Q_2 برمی‌گردد. در لحظهٔ t_3، $V_i=-۰/۱$ V و $V_{be}=-۰/۱+۰/۴=۰/۳$ V می‌شود و با کم شدن V_{be}، I_B کاهش یافته و نقطه کار از Q_2 به Q_3 تغییر می‌یابد.

در لحظات t_1 و t_3 که نقطهٔ کار تغییر می‌کند، نقطهٔ کار جدید را به دست می‌آوریم.

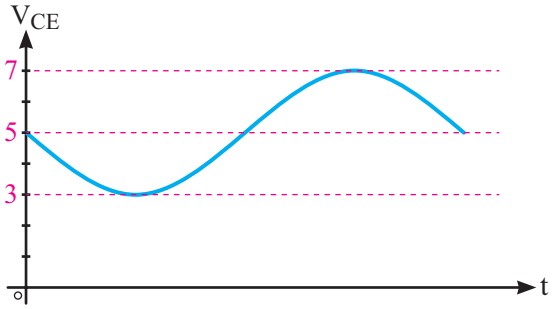
نتیجه چنین است :

$$Q_{t1}\begin{cases}V_{be}=۰/۵V\\I_B=۶۰\mu A\\I_C=۶mA\\V_{CE}=۳V\end{cases}\qquad Q_{t3}\begin{cases}V_{be}=۰/۳V\\I_B=۴۰\mu A\\I_C=۴mA\\V_{CE}=۷V\end{cases}$$

بنابراین، با اعمال ولتاژ به ورودی، نقطهٔ کار بین Q_1 و Q_3 نوسان می‌کند. به عبارت دیگر، ولتاژی با دامنهٔ نوسان حداکثر ۰/۲ ولت به ورودی داده شده است و ولتاژی با دامنهٔ نوسان حداکثر ۴ ولت در خروجی ظاهر شده که بیانگر عمل تقویت‌کنندگی است.

همان‌طور که ملاحظه می‌کنید، سیگنال ورودی را می‌توان به بیس و امیتر داد و خروجی را از کلکتور و امیتر گرفت. هدف از به کارگیری خازن C_1 در مدار ورودی، جلوگیری از عبور جریان DC از منبع متناوب است زیرا در این صورت، نقطهٔ کار ترانزیستور به هم می‌خورد.

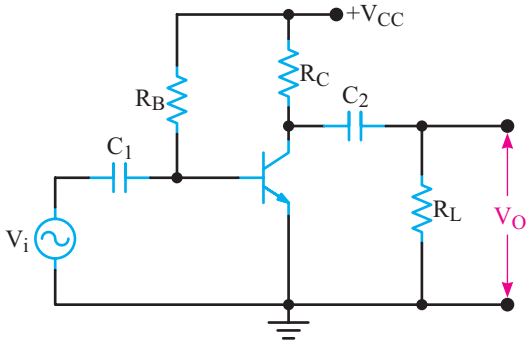
گفتیم که خروجی را می‌توان از کلکتور امیتر ترانزیستور گرفت، امّا توجه داشته باشید که این ولتاژ دارای دو مؤلفهٔ ac و DC، مطابق شکل ۷۱ــ۱ است.



شکل ۷۱ــ۱ــ سیگنال خروجی بدون خازن C_2

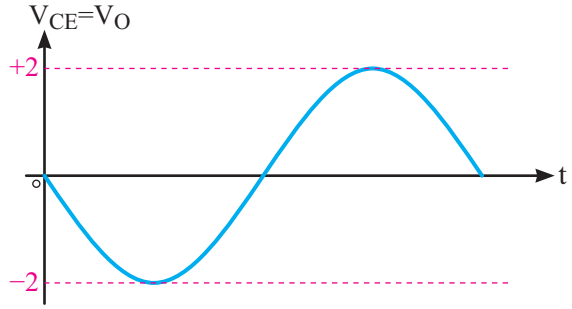
برای جدا کردن مؤلفه ac از مؤلفه DC از یک خازن مطابق شکل ۷۲ــ۱ در خروجی مدار استفاده می‌کنیم (خازن C_2) و بار (بلندگو و غیره) را توسط این خازن به کلکتور وصل می‌کنیم.

خازن‌های C_1 و C_2 را **خازن‌های کوپلاژ** می‌نامند.



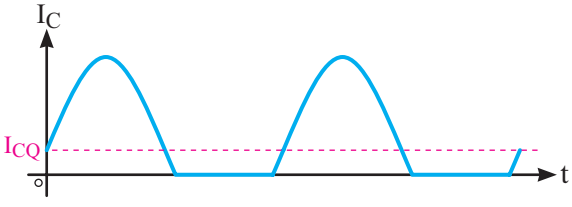
شکل ۷۲ــ۱ــ مدار یک تقویت‌کننده با خازن‌های کوپلاژ

شکل ۷۳ــ۱ سیگنال متناوب تقویت شده خروجی را که مؤلفهٔ DC آن توسط خازن کوپلاژ C_2 حذف شده است، نشان می‌دهد.

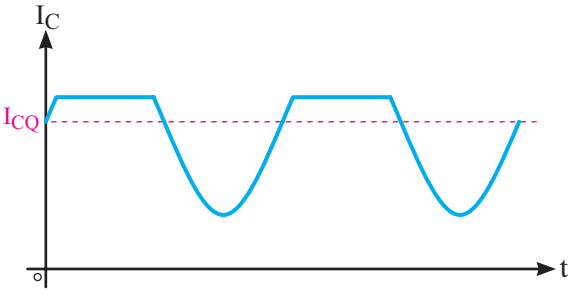


شکل ۷۳ــ۱ــ سیگنال متناوب خروجی بدون مؤلفهٔ DC

اگر نقطهٔ کارDC در محل مناسب انتخاب نشود، در شکل جریان کلکتور و ولتاژ خروجی تغییر نامطلوب (اعوجاج) ایجاد می‌شود. شکل‌های ۷۴ــ۱ و ۷۵ــ۱ تغییر شکل ناشی از تغذیهٔ ناکافی و بیش از اندازه را روی جریان کلکتور نشان می‌دهد.



شکل ۷۴ــ۱ــ اعوجاج ناشی از تغذیهٔ ناکافی

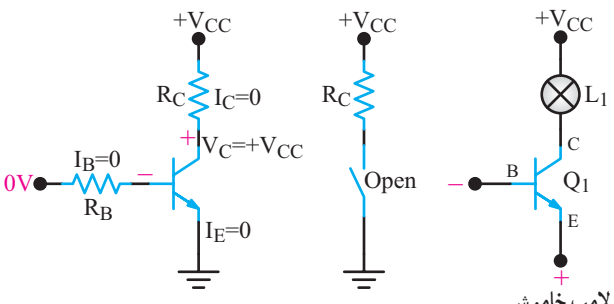


شکل ۷۵ــ۱ــ اعوجاج ناشی از تغذیهٔ بیش از اندازه

۱۱ــ۱ــ عمل کلیدزنی (سوئیچینگ) ترانزیستور

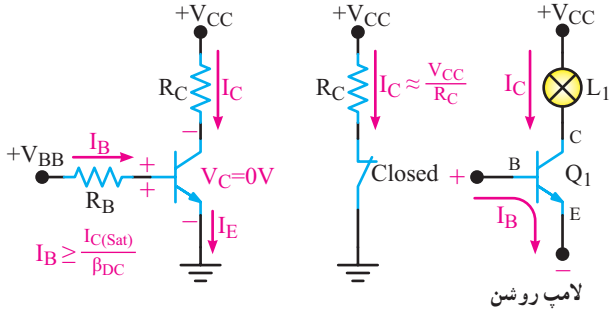
همان‌طور که می‌دانید، هر کلیدی دارای دو وضعیت قطع و وصل است. وقتی که کلید قطع (خاموش) است، مقاومت الکتریکی بسیار زیادی دارد، امّا وقتی که وصل (روشن) است، دارای مقاومت فوق‌العاده کمی است. برای تغییر دادن وضعیت یک کلید معمولی انرژی مکانیکی مورد نیاز است.

رله کلیدی است که برای تغییر وضعیت خود از انرژی الکترومغناطیس استفاده می‌کند. کلید و رله که دارای ویژگی‌های گفته شده هستند، اشکالاتی نیز دارند که از آن جمله می‌توان ایجاد قوس الکتریکی بین اتصال‌ها، خمیدگی اتصال‌ها، فرسودگی قسمت‌های متحرک و کندی کار آن‌ها را نام برد. با به کار گرفتن ترانزیستورها به عنوان کلید می‌توان اشکالات فوق را از میان برداشت. ترانزیستور معمولی را می‌توان به عنوان کلید به کار برد. با بررسی مدار شکل ۷۶ــ۱ می‌بینیم که مقاومت بین کلکتور و امیتر تابعی از جریان موافقی است که از پیوند بیس امیتر عبور می‌کند. وقتی از این پیوند جریانی عبور نمی‌کند (ولتاژ مخالف)، مقاومت بین کلکتور و امیتر بسیار زیاد است. در این حالت، ترانزیستور مانند یک کلید باز عمل می‌کند و مانع عبور جریان می‌شود؛ بنابراین، لامپ خاموش می‌ماند.



شکل ۷۶ــ۱ــ ترانزیستور به عنوان کلید باز

با وصل یک ولتاژ مثبت به بیس و قرار دادن ترانزیستور در ناحیه اشباع مانند شکل ۷۷ــ۱ جریان در پیوند بیس امیتر برقرار می‌شود (اتصال مذکور در بایاس موافق است)، مقاومت بین کلکتور و امیتر بسیار کم می‌شود و جریان نسبتاً زیادی از مدار عبور می‌کند. در این حالت، مدار مانند یک کلید بسته عمل خواهد کرد و لامپ روشن خواهد شد. هنگامی که ولتاژ موافق را از ترانزیستور قطع کنیم، مقاومت بین کلکتور و امیتر فوق‌العاده زیاد می‌شود و چون جریانی از مدار عبور نمی‌کند، لامپ خاموش خواهد شد. ترانزیستور می‌تواند مقدار شدت جریان داده شده به مصرف‌کننده را در محدودهٔ وسیعی بین دو حالت قطع و وصل تغییر دهد و به همین دلیل، بر کلیدهای مکانیکی یا الکترومغناطیسی برتری دارد.



شکل ۷۷ــ۱ــ ترانزیستور به عنوان کلید بسته

۱۲ــ۱ــ الگوی پرسش

کامل کردنی

۱ــ۱۲ــ۱ــ منحنی تغییرات V_{BE} ، I_B به ازای یک ولتاژ معین از ..... منحنی مشخصهٔ ..... نام دارد.

۲ــ۱۲ــ۱ــ اگر نقطهٔ کار ترانزیستور بین ..... و ..... متغیر باشد ترانزیستور مانند یک کلید عمل می‌کند.

صحیح یا غلط

۳ــ۱۲ــ۱ــ هدایت انتقالی ترانزیستور از رابطهٔ

$$g_m = \frac{I_C}{۲۶mV} = \frac{I_E}{۲۶mV}$$

به دست می‌آید.

☐ صحیح ☐ غلط

۴ـ۱۲ـ۱ـ مقاومت خروجی یک تقویت کنندهٔ ترانزیستوری از رابطه :

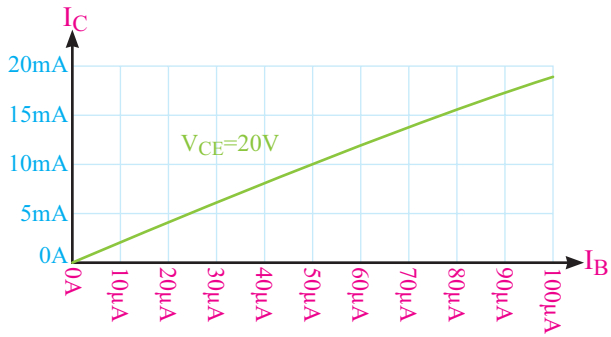
$$R_O = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} \Big|_{I_B \text{ ثابت}}$$

به دست می‌آید.

☐ صحیح ☐ غلط

چهار گزینه‌ای

۵ـ۱۲ـ۱ـ از روی منحنی مشخصهٔ شکل ۷۸ـ۱ کدام کمیت ترانزیستور را می‌توان به دست آورد؟



شکل ۷۸ـ۱

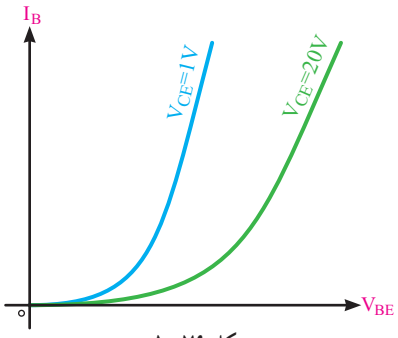
۱ـ AI (بهرهٔ جریان تقویت کننده)

۲ـ β_{DC} (بهرهٔ جریان استاتیکی)

۳ـ R_i (مقاومت ورودی تقویت کننده)

۴ـ AV (بهرهٔ ولتاژ تقویت کننده)

۶ـ۱۲ـ۱ـ درمنحنی مشخصهٔ ورودی ترانزیستور در شکل ۷۹ـ۱ اگر V_{BE} ثابت باشد، با افزایش V_{CE} ، کدام گزینه صحیح است؟



شکل ۷۹ـ۱

۱ـ I_B زیاد می‌شود.

۲ـ I_B کم می‌شود.

۳ـ I_B ثابت می‌ماند.

۴ـ I_C زیاد می‌شود.

محاسباتی

۷ـ۱۲ـ۱ـ با توجه به جدول ۱ـ۱ در نقطهٔ A مقاومت استاتیکی و از نقطهٔ B تا C مقاومت دینامیکی دیودبیس امیتر ترانزیستور را به دست آورید.

جدول ۱ـ۱

نقطه	V_{BE}(ولت)	I_B(میکرو آمپر)
A	۰/۵	۲۰۰
B	۰/۶	۳۰۰
C	۰/۷	۴۰۰

۸ـ۱۲ـ۱ـ اگر I_{CQ} در یک تقویت کنندهٔ ترانزیستوری 5mA باشد هدایت انتقالی ترانزیستور را محاسبه کنید.(در دمای محیط)