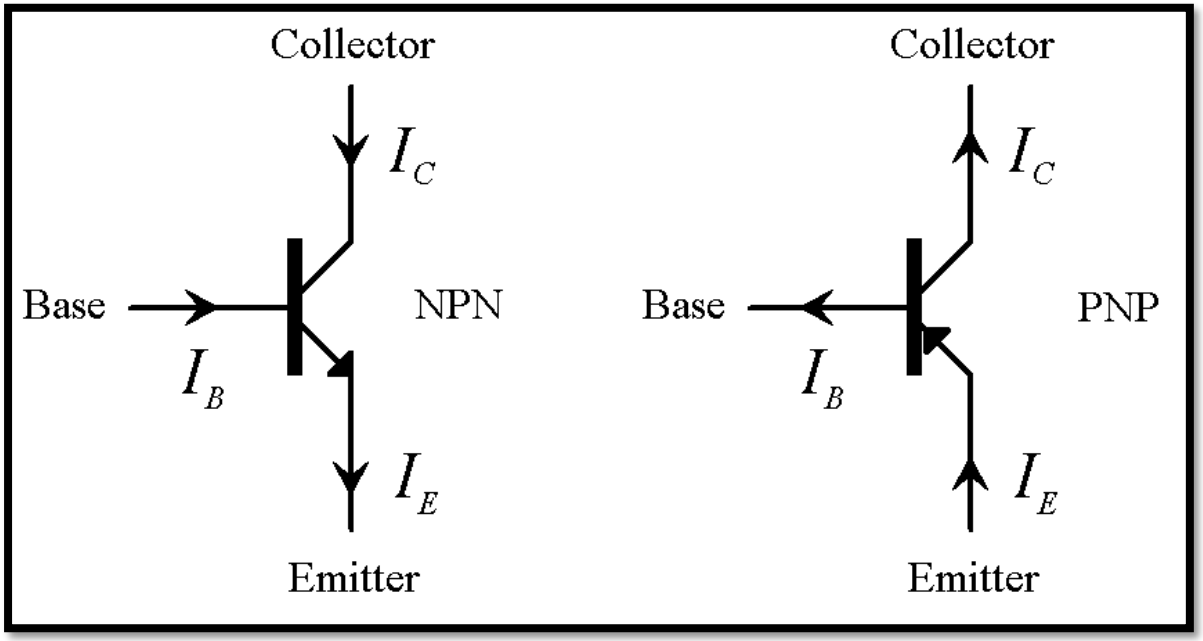
به نام خدا

الکترونیک(۱)

مدرس:
میریوسفی
دانشگاه فنی و حرفه ای البرز

فصل چهارم

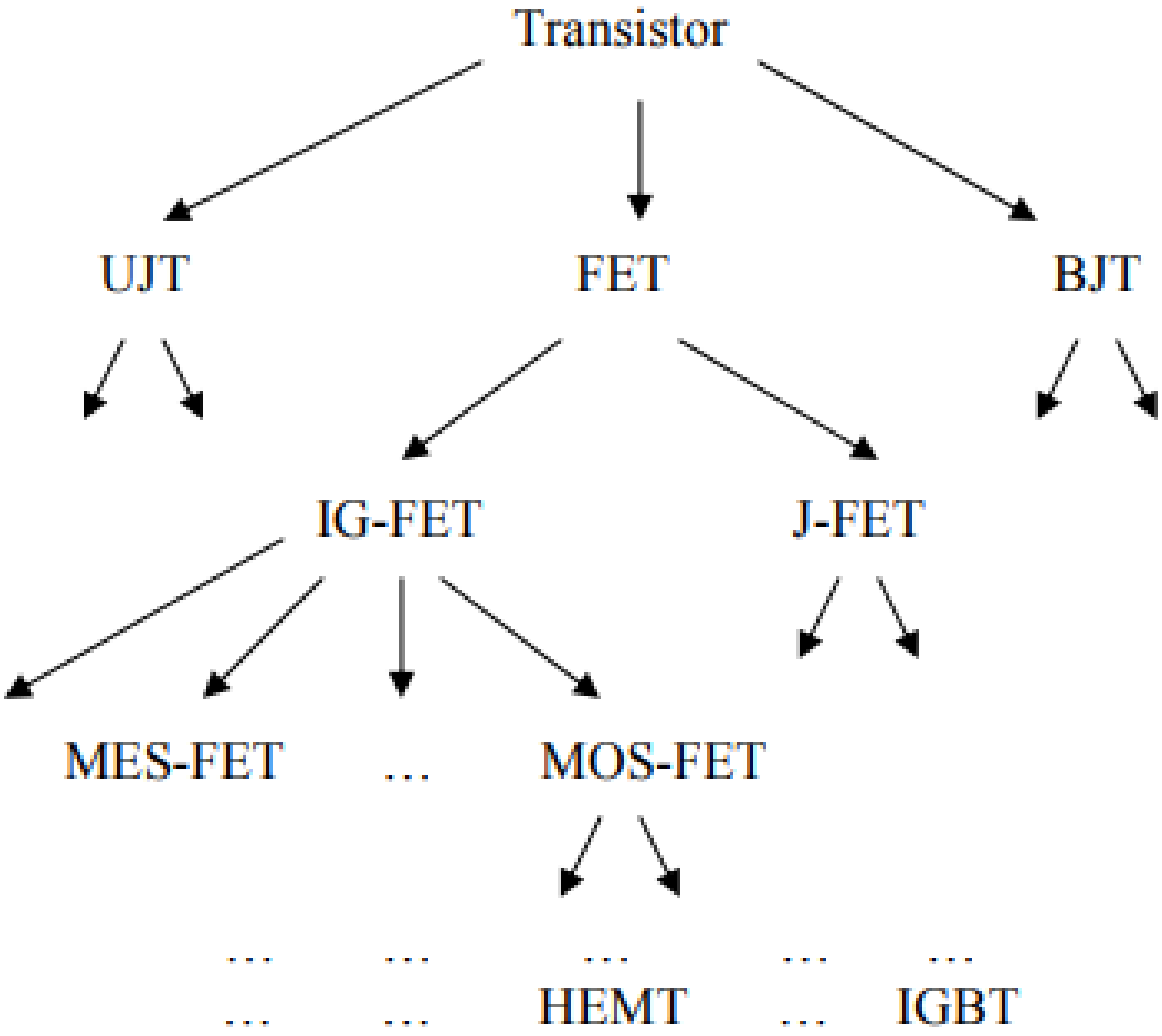


ترانزیستور پیوندی دو قطبی

BJT

Bipolar Junction Transistor

انواع متداول ترانزیستور

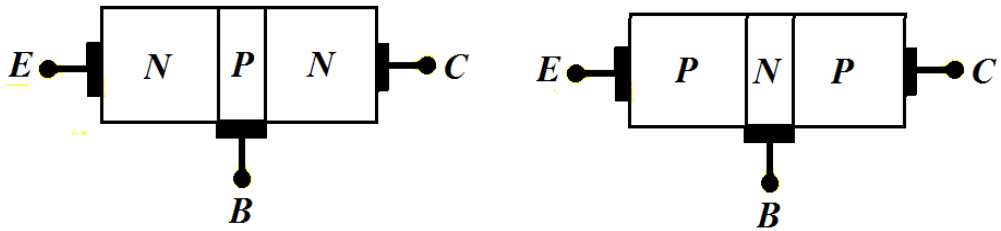


مقدمه

- BJT در سال ۱۹۴۸ اختراع شده است.
- با معرفی دستگاه هائی که با ترانزیستور نیمه هادی کار می کردند انقلابی در دنیا پدید آمد.
- ترانزیستور BJT برای سالهای متمادی انتخاب اول برای انواع دستگاههای دیجیتال و آنالوگ بود
- در دهه اخیر ترانزیستور BJT به سرعت با MOSFET جایگزین شد.
- BJT امروزه در مدارات آنالوگ و به خصوص فرکانس بالا کاربرد زیادی دارد.

ترانزیستور یک قطعه الکترونیکی فعال بوده و از ترکیب سه قطعه n و p بدست می‌آید

ترانزیستورهای دوقطبی پیوندی در دونوع npn و pnp ساخته می‌شوند.



(ب) ترانزیستور *NPN*

(الف) ترانزیستور *PNP*

First - BJTs

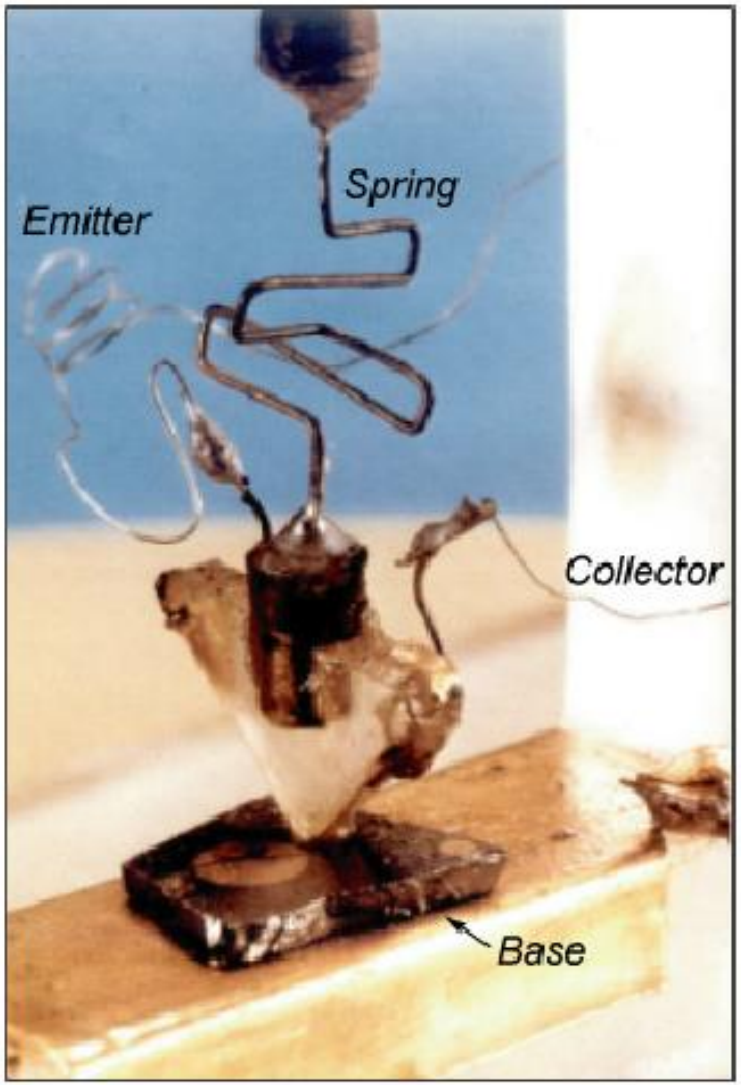
مهمترین اختراع قرن ۲۰ ام

ترانزیستور در سال ۱۹۴۷ در آزمایشگاه بل هنگام تحقیق برای تقویت کننده های بهتر و یافتن جایگزینی بهتر برای رله های مکانیکی اختراع شد.
عصر نوین الکترونیک نیمه رساناها با اختراع ترانزیستور دوقطبی باردین، براتاین و شاکلی آغاز شد.

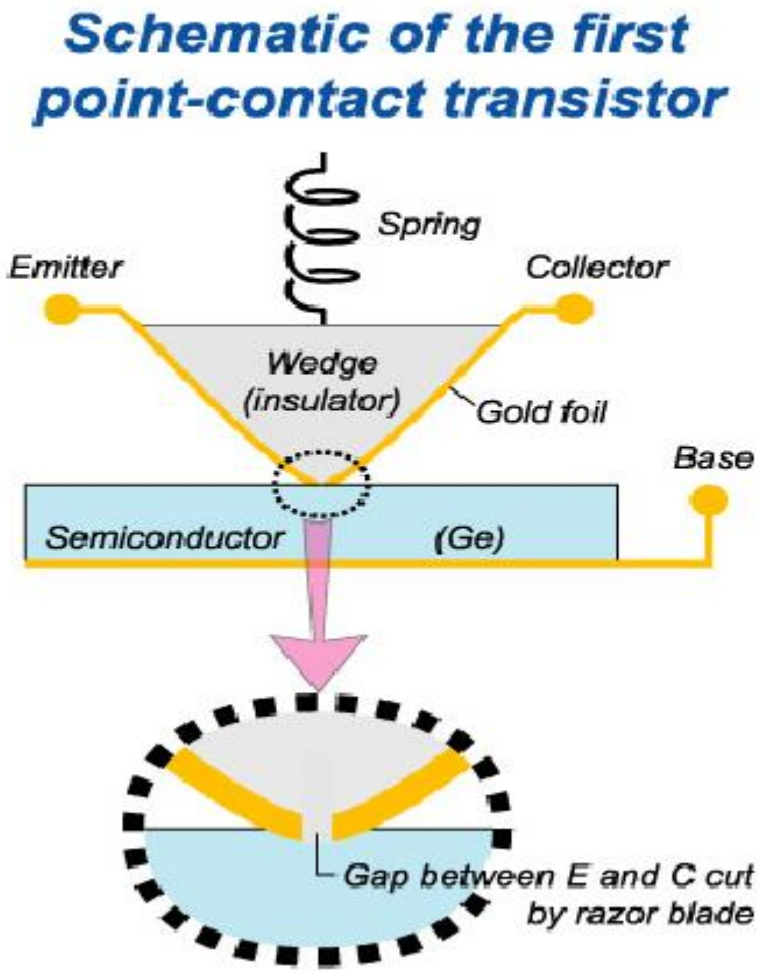
The first transistor was a point-contact transistor

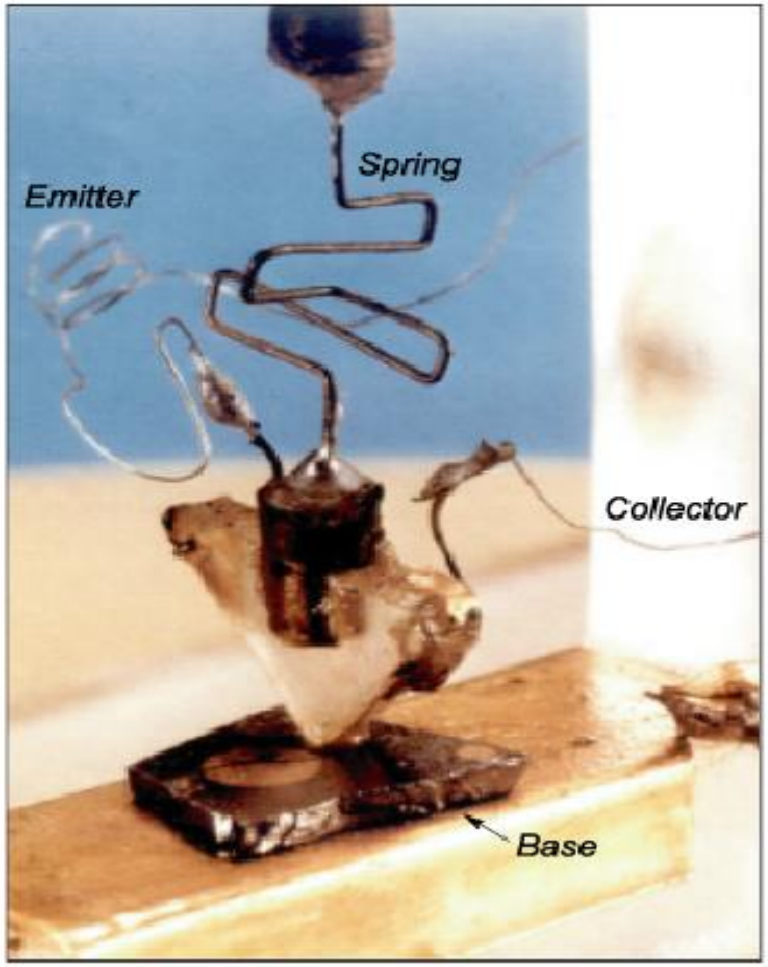
The first point-contact transistor

John Bardeen, Walter Brattain, and William Shockley
Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey (1947)



How did first point-contact transistor work?



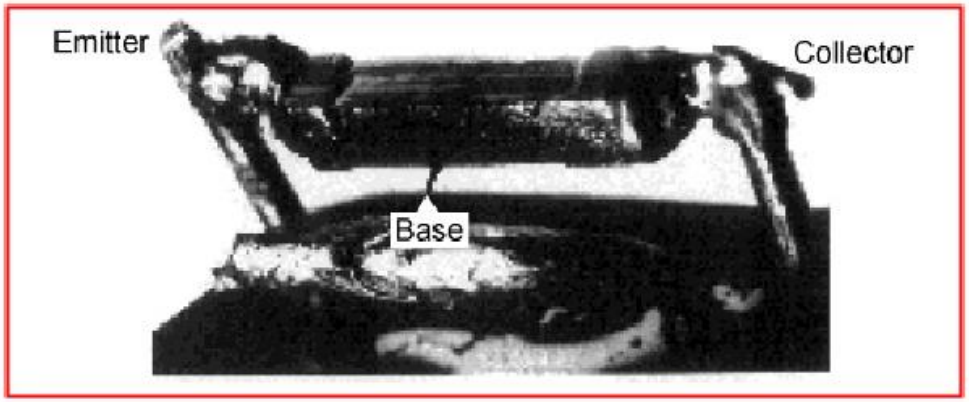


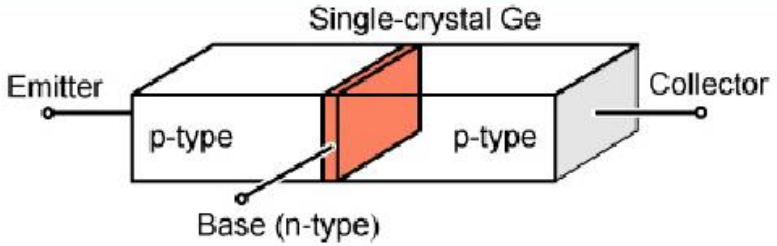
First Bipolar Junction Transistors

W. Shockley invented the p-n junction transistor
The physically relevant region is moved to the bulk of the material

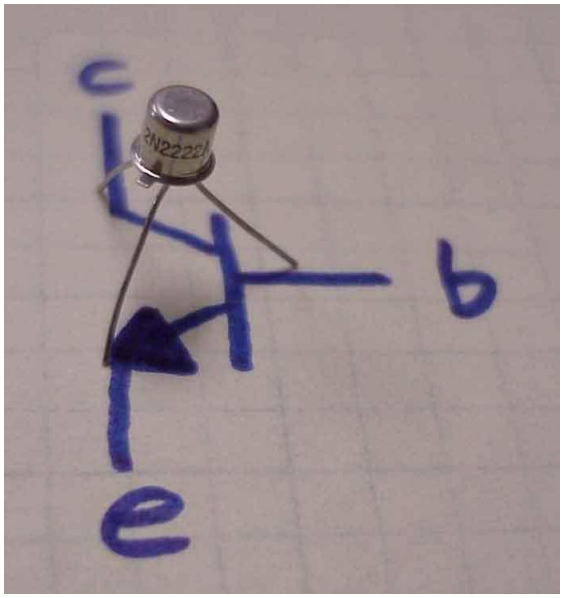
The First Junction Transistor

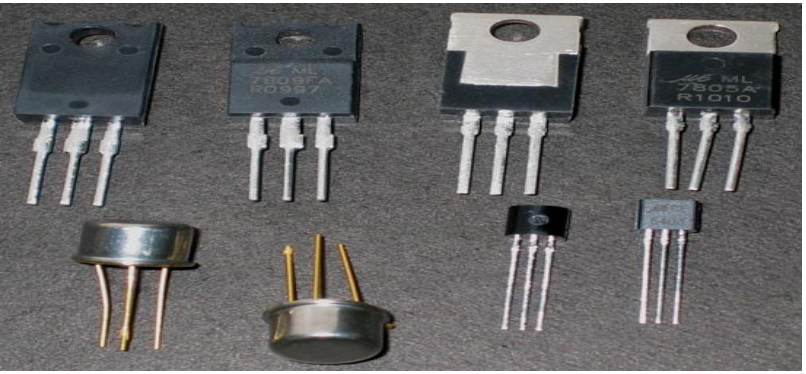
First transistor with diffused pn junctions by William Shockley
Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey (1949)

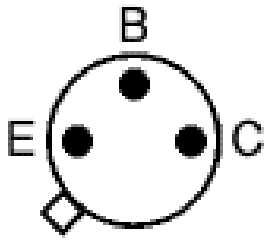




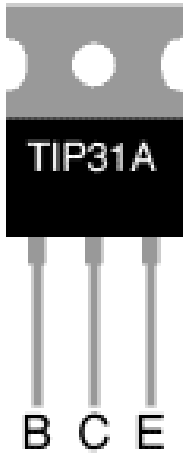
BJTs – Practical Aspects







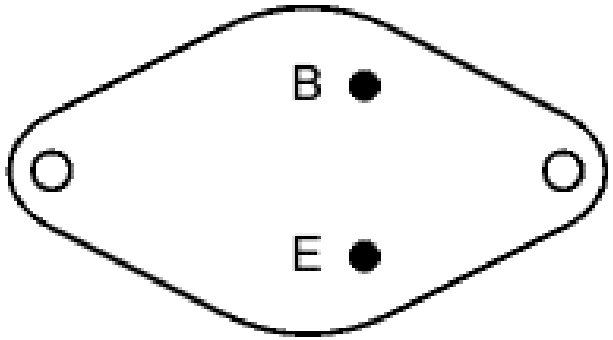
TO18
TO39



TO218
TO220

TO92A TO92B TO92C

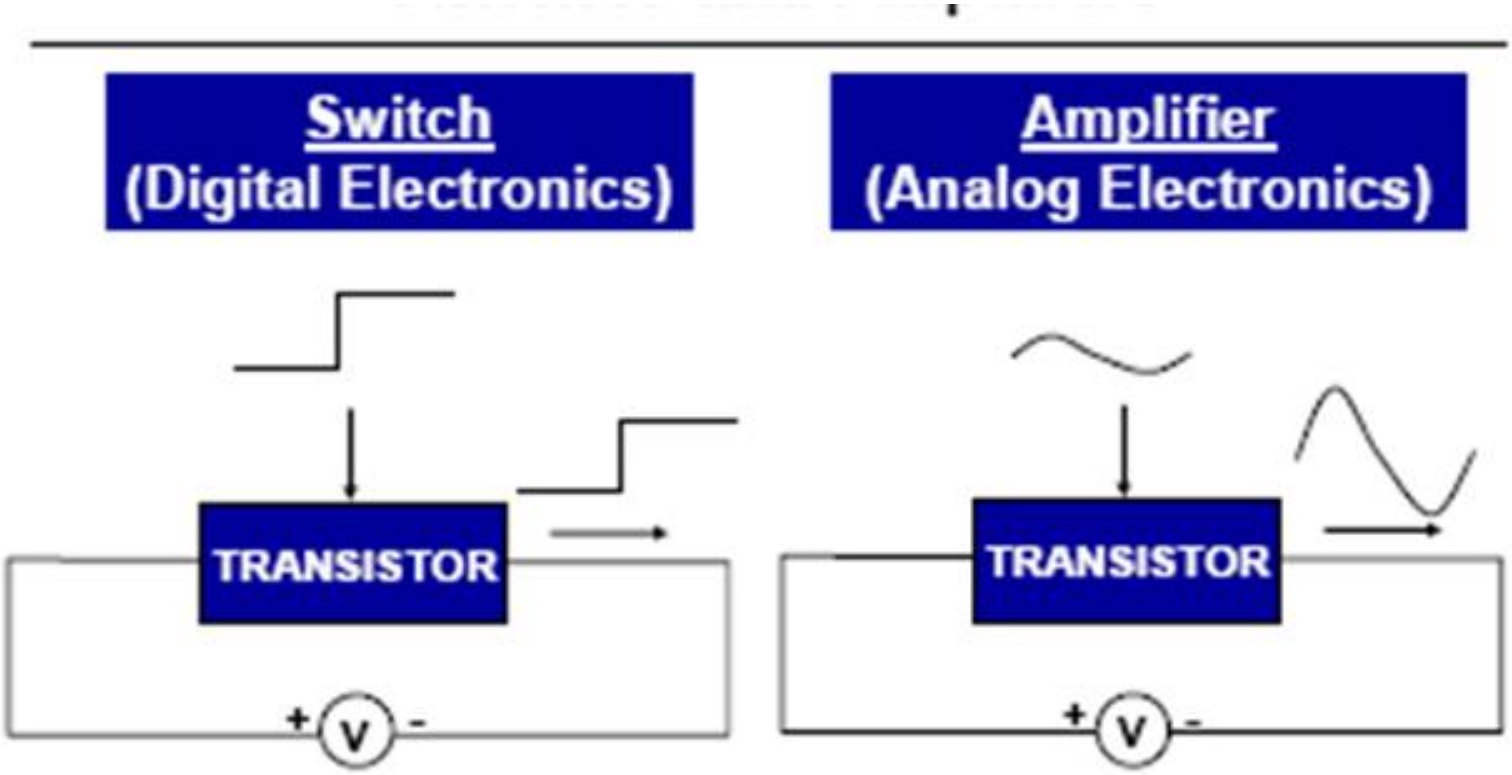
Views are from below with the leads towards you.



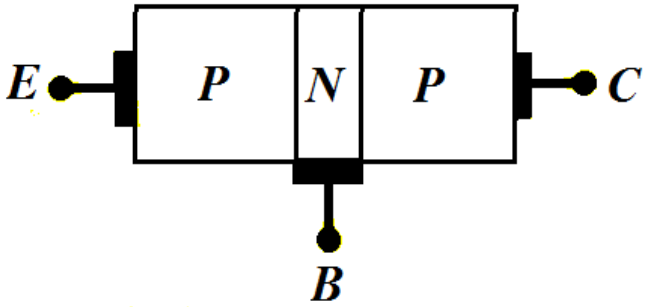
C is the metal case itself

TO3

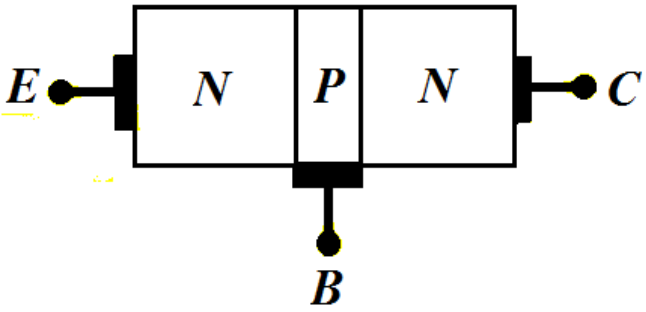
کاربردهای اصلی ترانزیستور BJT



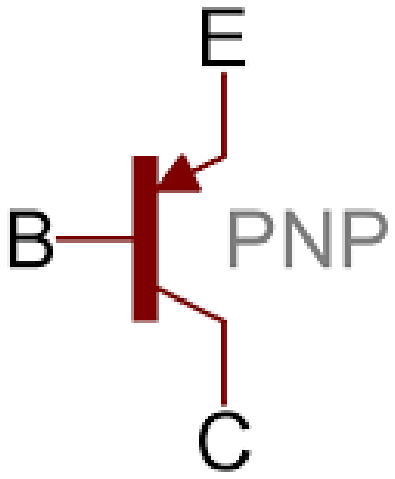
ساختمان ترانزیستور

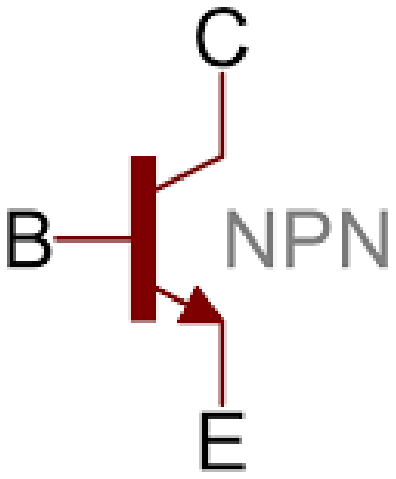


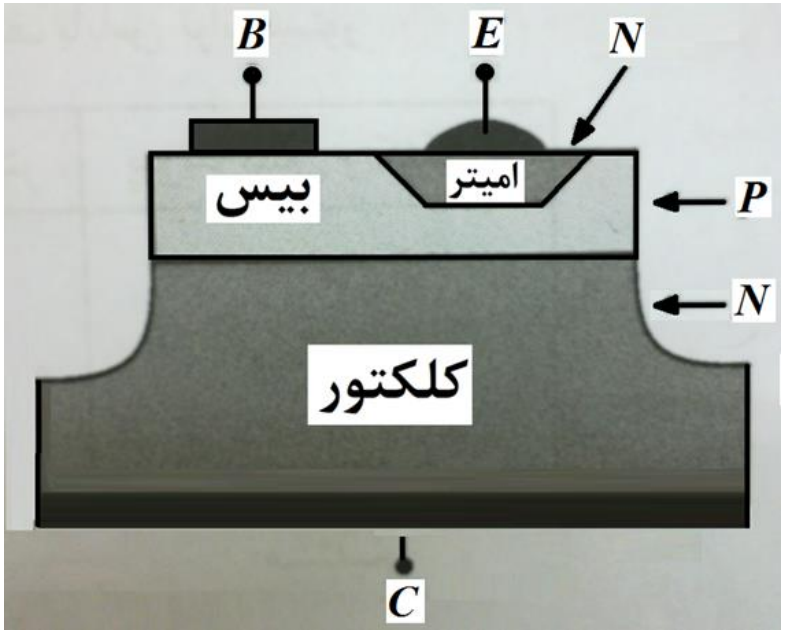
(الف) ترانزیستور *PNP*



(ب) ترانزیستور *NPN*





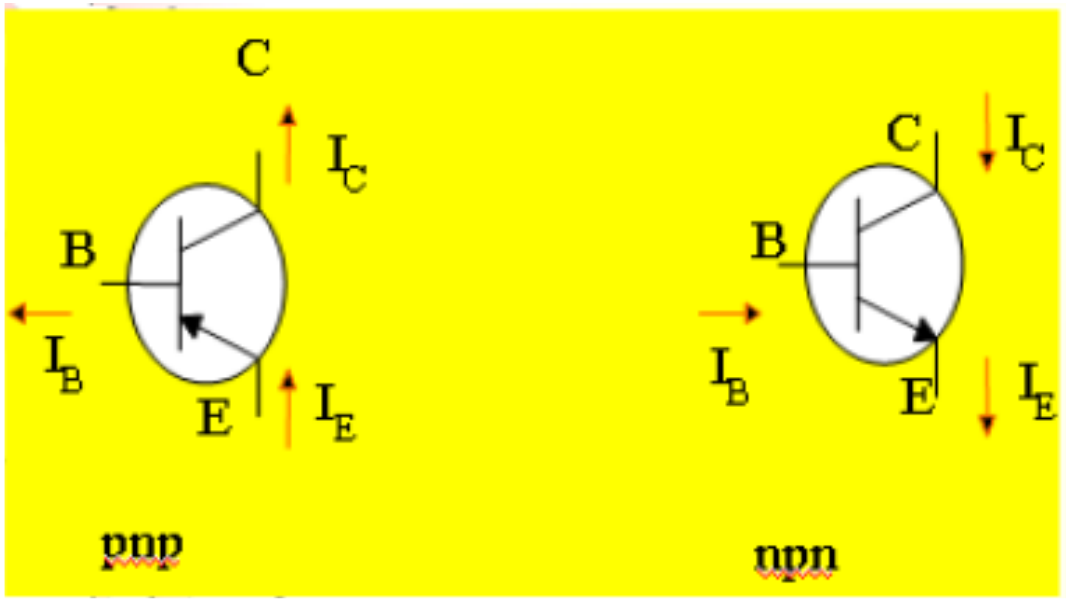


ساختمان واقعی یک ترانزیستور NPN

بیس : چون در ابتدا ترانزیستور روی آن ساخته می شده است

امیتر: فرستنده حامل ها

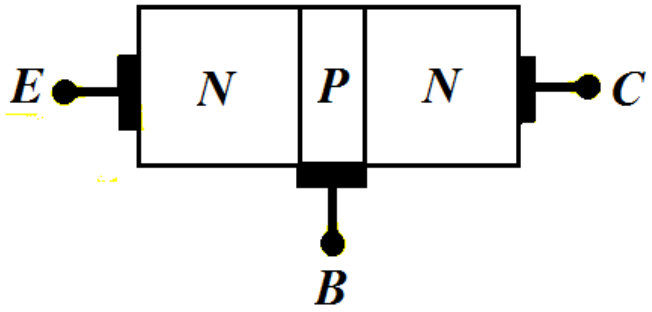
کلکتور: جمع کننده حاملها



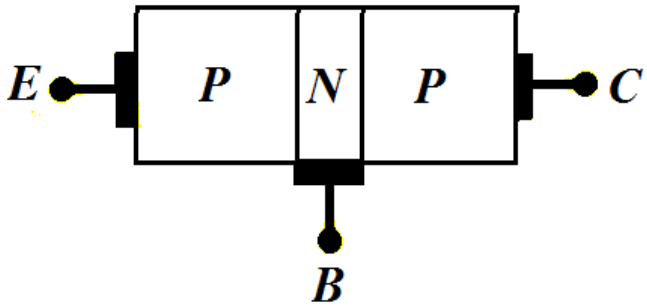
I_C=the collector current

I_B= the base current

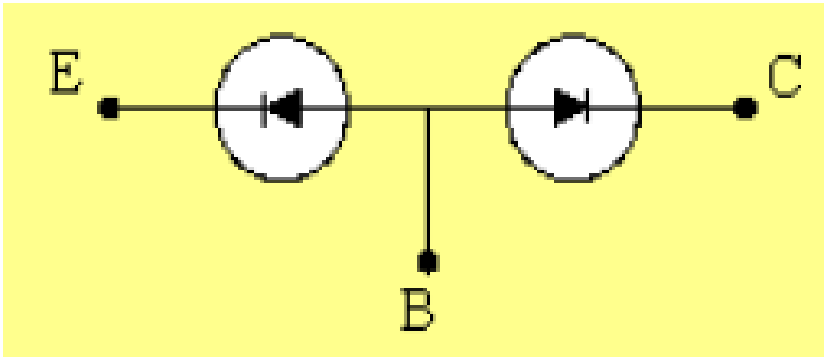
I_E= the emitter current

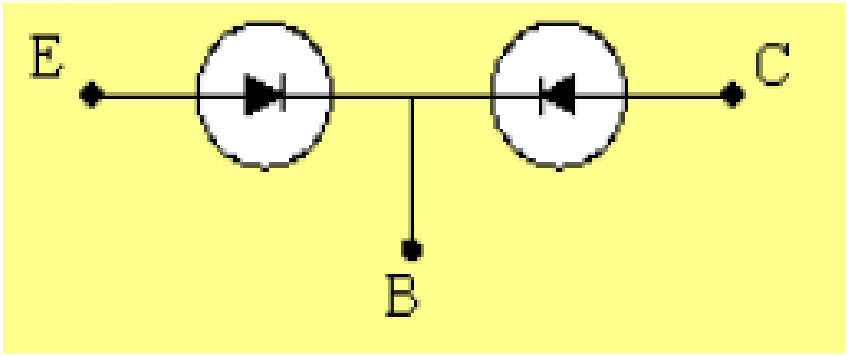


(ب) ترانزیستور *NPN*



(الف) ترانزیستور *PNP*





عرض **C** > عرض **E** > عرض **B**

چگالی **B** > چگالی **C** > چگالی **E**

نواحی کاری ترانزیستور

Modes	EBJ	CBJ	Application
Cutoff	Reverse	Reverse	Switching application in digital circuits
Saturation	Forward	Forward	
Active	Forward	Reverse	Amplifier
Reverse active	Reverse	Forward	Performance degradation

اساس کار ترانزیستورPNP در ناحیه فعال

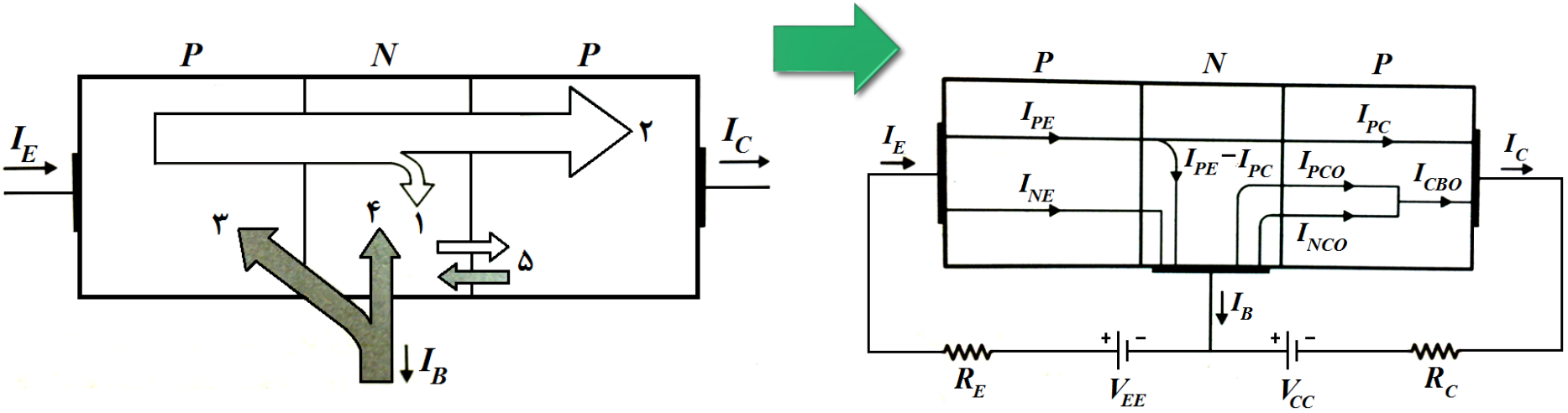
۱. حفره‌های تزریقی از امیتر که در بیس با الکترون‌های آزاد بازترکیب می‌شوند.

۲. حفره‌های تزریقی از امیتر که به کلکتور می‌رسند.

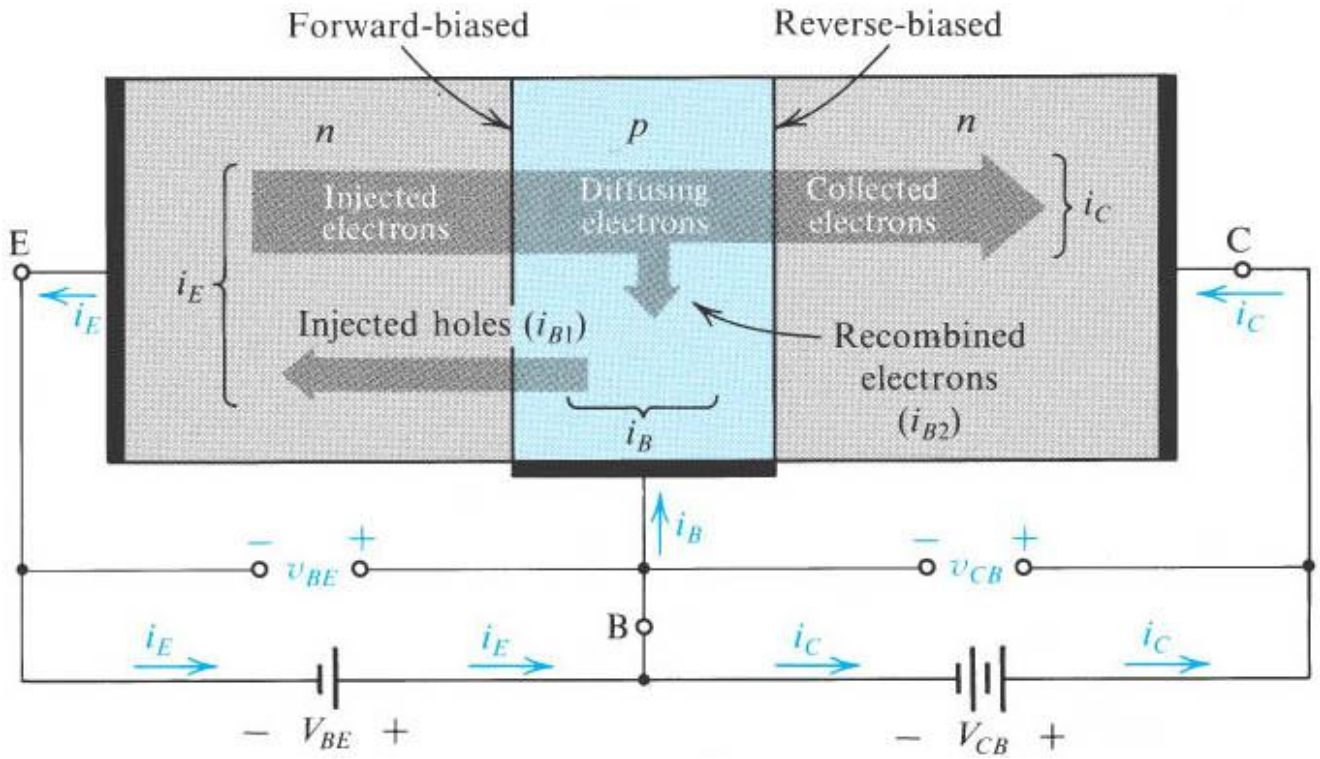
۳. الکترون‌های آزاد تزریقی از بیس به امیتر در محل پیوند، در حالت هدایت پیوند امیتر – بیس.

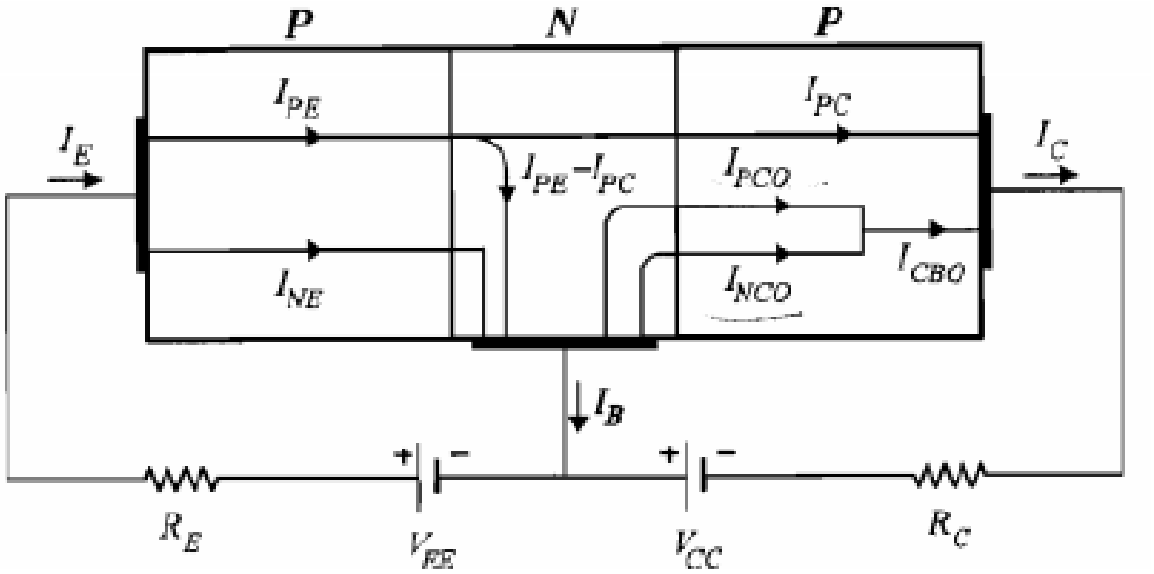
۴. الکترون‌های آزاد که توسط بیس جهت ترکیب با حفره‌های تزریقی توسط امیتر تأمین می‌شوند.

۵. حامل‌های اقلیت که جریان اشباع معکوس پیوند کلکتور – بیس را تشکیل می‌دهند.



ترانزیستور NPN در ناحیه فعال





$$I_C = I_{PC} + I_{CBO}$$

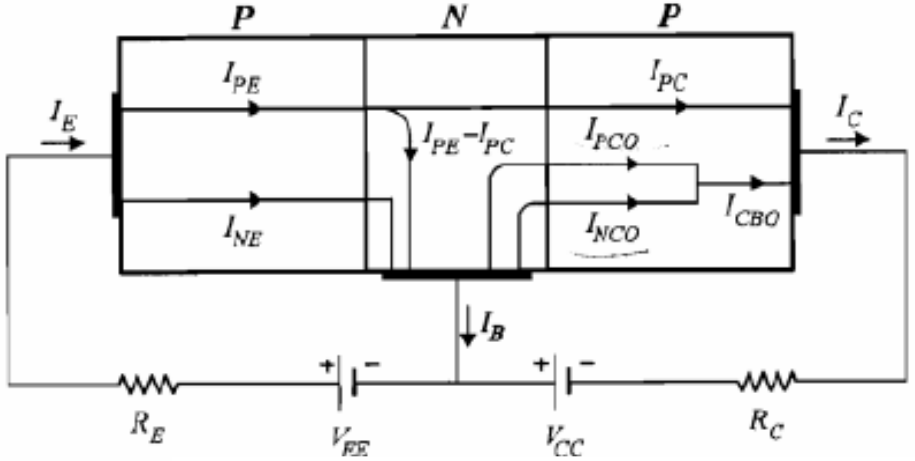
$$I_E = I_{PE} + I_{NE}$$

$$\gamma = \frac{I_{PE}}{I_E}$$

$$\alpha^* = \frac{I_{PC}}{I_{PE}}$$

$$\alpha = \frac{I_{PC}}{I_E} = \frac{I_{PC}}{I_{PE}} \frac{I_{PE}}{I_E} = \alpha^* \gamma$$

بهره جریان سیگنال بزرگ بیس مشترک



$$I_C = I_{PC} + I_{CBO} = \alpha I_E + I_{CBO} \cong \alpha I_E$$

$$I_E = I_B + I_C$$

$$\Rightarrow \quad I_C = \alpha(I_B + I_C) + I_{CBO}$$

$$\Rightarrow \quad I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{1}{1-\alpha} I_{CBO} \quad \Rightarrow \quad I_C = \beta I_B + (1+\beta) I_{CBO} \cong \beta I_B$$

بهره جریان سیگنال بزرگ امیتر مشترک

ناحیه فعال

$$I_E = I_B + I_C$$

$$I_C = I_E - I_B$$

$$I_B = I_E - I_C$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{I_E}{1+\beta} = I_E(1-\alpha)$$

$$I_C = \beta . I_B = \alpha . I_E$$

$$I_E = \frac{I_C}{\alpha} = I_B(1+\beta)$$

NPN

$I_E = I_S [e^{VBE / VT}]$

PNP

$I_E = I_S [e^{VEB / VT}]$

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_C = \alpha I_E$$

$$I_E = I_B(\beta + 1)$$

$$\alpha = [\beta / \beta + 1]$$

$$\beta = [\alpha / 1 - \alpha]$$

Based on KCL: $I_E = I_C + I_B$

اساس کار ترانزیستور در ناحیه قطع

در ناحیه قطع پیوند CB در حالت گرایش معکوس قرار دارد و پیوند EB هدایت نمی کند

در این ناحیه هیچ جریانی از ترانزیستور عبور نخواهد کرد.

VE-VB=VEB <.5v , VC-VB =VCB < 0

$$i_B = i_C = i_E = 0.0 \text{ for a BJT in Cutoff}$$

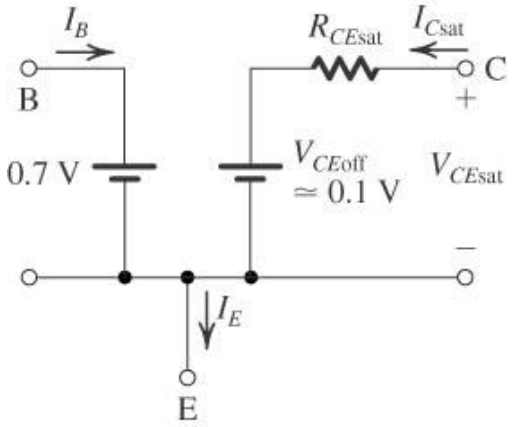
اساس کار ترانزیستور در ناحیه اشباع

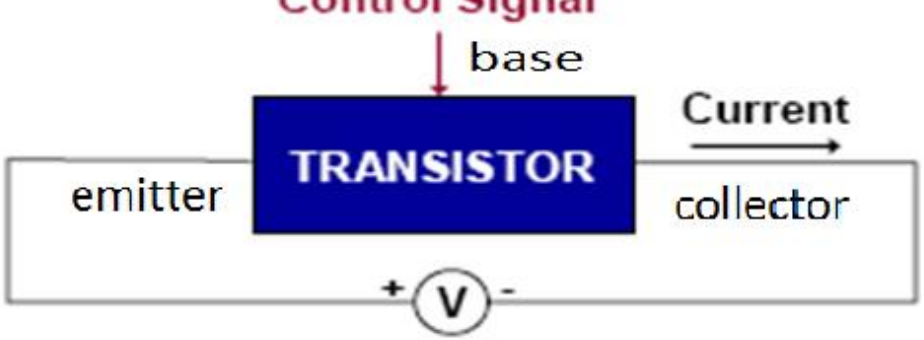
در این ناحیه هر دو پیوند ترانزیستور بصورت گرایش مستقیم قرار می گیرند

این امر باعث میشود تا جریان ic کمتر از مقدار آن در ناحیه فعال گردد. یعنی در این ناحیه داریم:

$$i_C < \beta i_B \quad \text{for BJT in SAT}$$

ولتاژ VCE در حدود 0.2v باقی خواهد ماند. مدار معادل زیر را میتوان برای این ناحیه بکار برد.

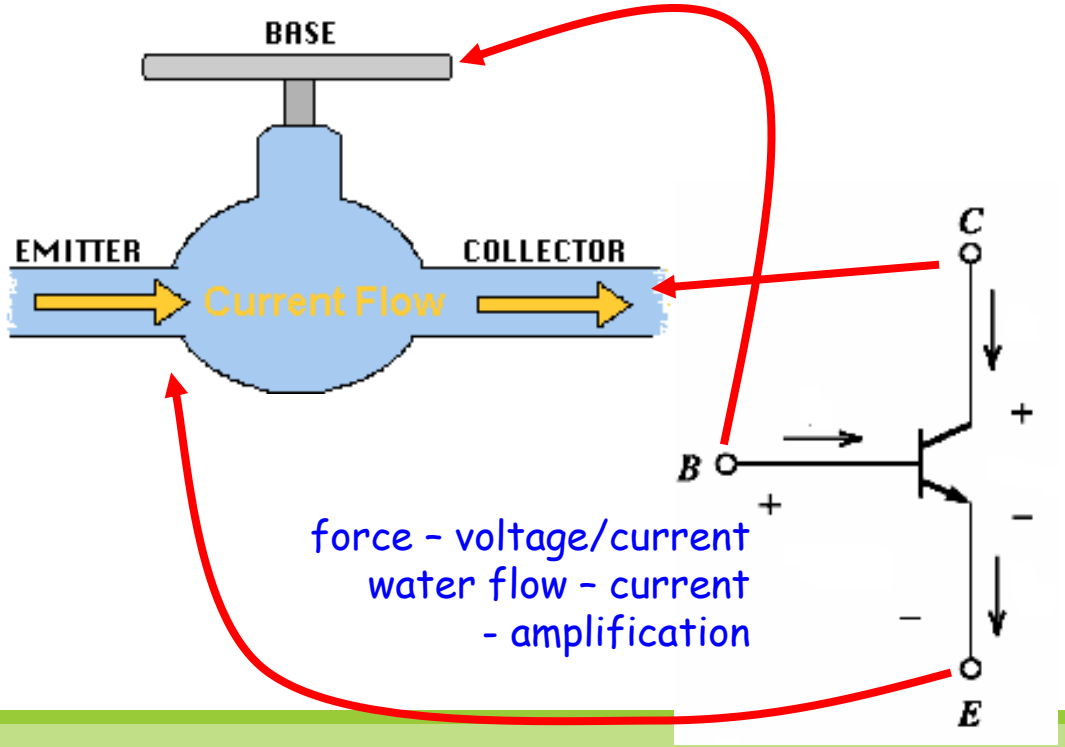




ترانزیستور BJT یک منبع جریان کنترل شونده است

Understanding of BJT

عملکرد ترانزیستور NPN



منحنی مشخصه های ترانزیستور

منحنی مشخصه ورودی

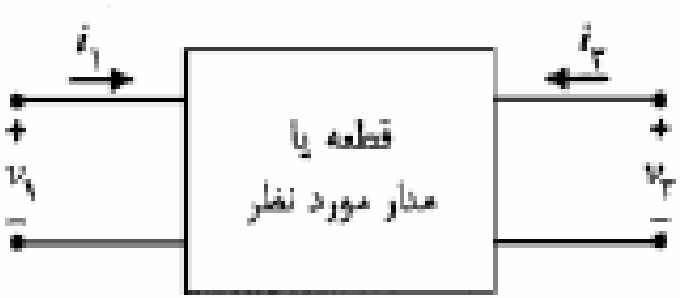
- منحنی تغییرات جریان ورودی نسبت به تغییرات ولتاژ ورودی به ازای ولتاژ خروجی ثابت

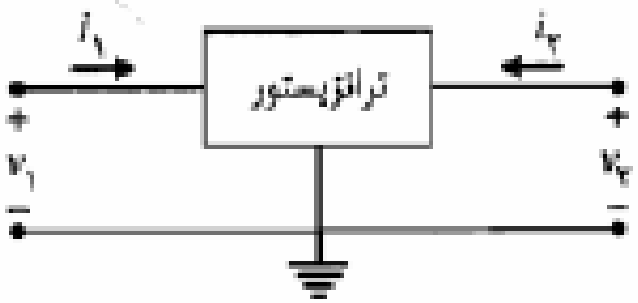
منحنی مشخصه خروجی

- منحنی تغییرات جریان خروجی نسبت به تغییرات ولتاژ خروجی به ازای جریان ورودی ثابت

منحنی مشخصه انتقالی

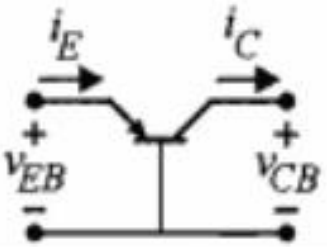
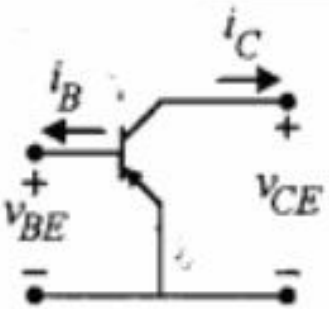
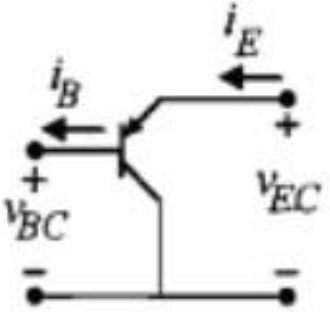
- منحنی تغییرات جریان ورودی نسبت به تغییرات جریان خروجی به ازای ولتاژ خروجی ثاب



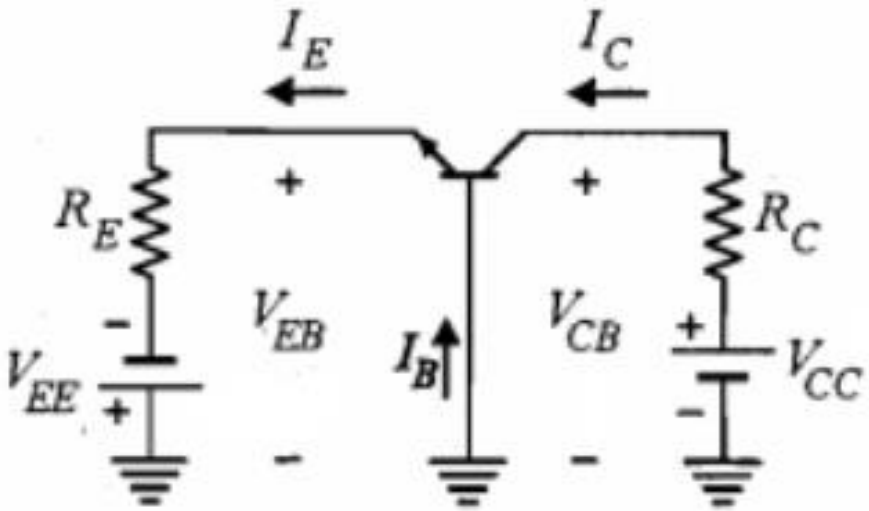


انواع آرایش ترانزیستور

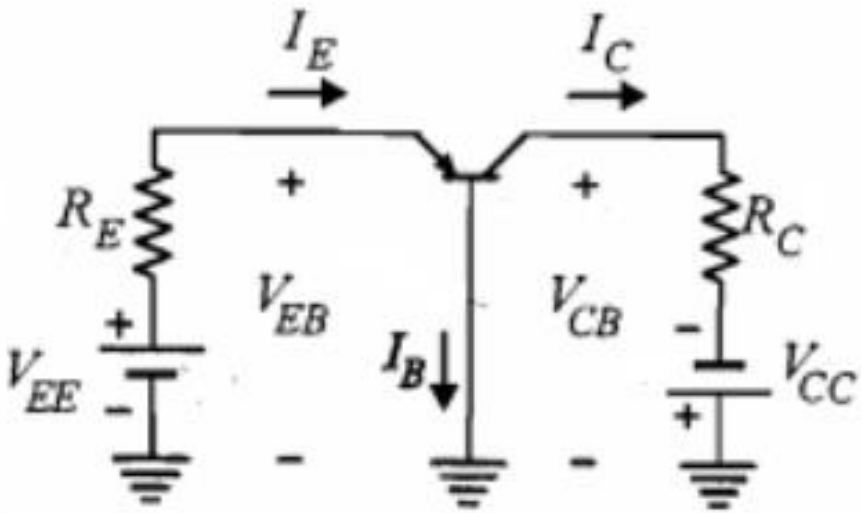
- بیس مشترک
- امیتر مشترک
- کلکتور مشترک

نوع ترکیب	مشخصه خروجی	مشخصه ورودی
بیس مشترک 	$i_C = f_1(i_E, v_{CB})$	$i_E = g_1(v_{CB}, v_{EB})$
امیتر مشترک 	$i_C = f_2(i_B, v_{CE})$	$i_B = g_2(v_{CE}, v_{BE})$
کلکتور مشترک 	$i_E = f_3(i_B, v_{EC})$	$i_B = g_3(v_{EC}, v_{BC})$

ترکیب بیس مشترک

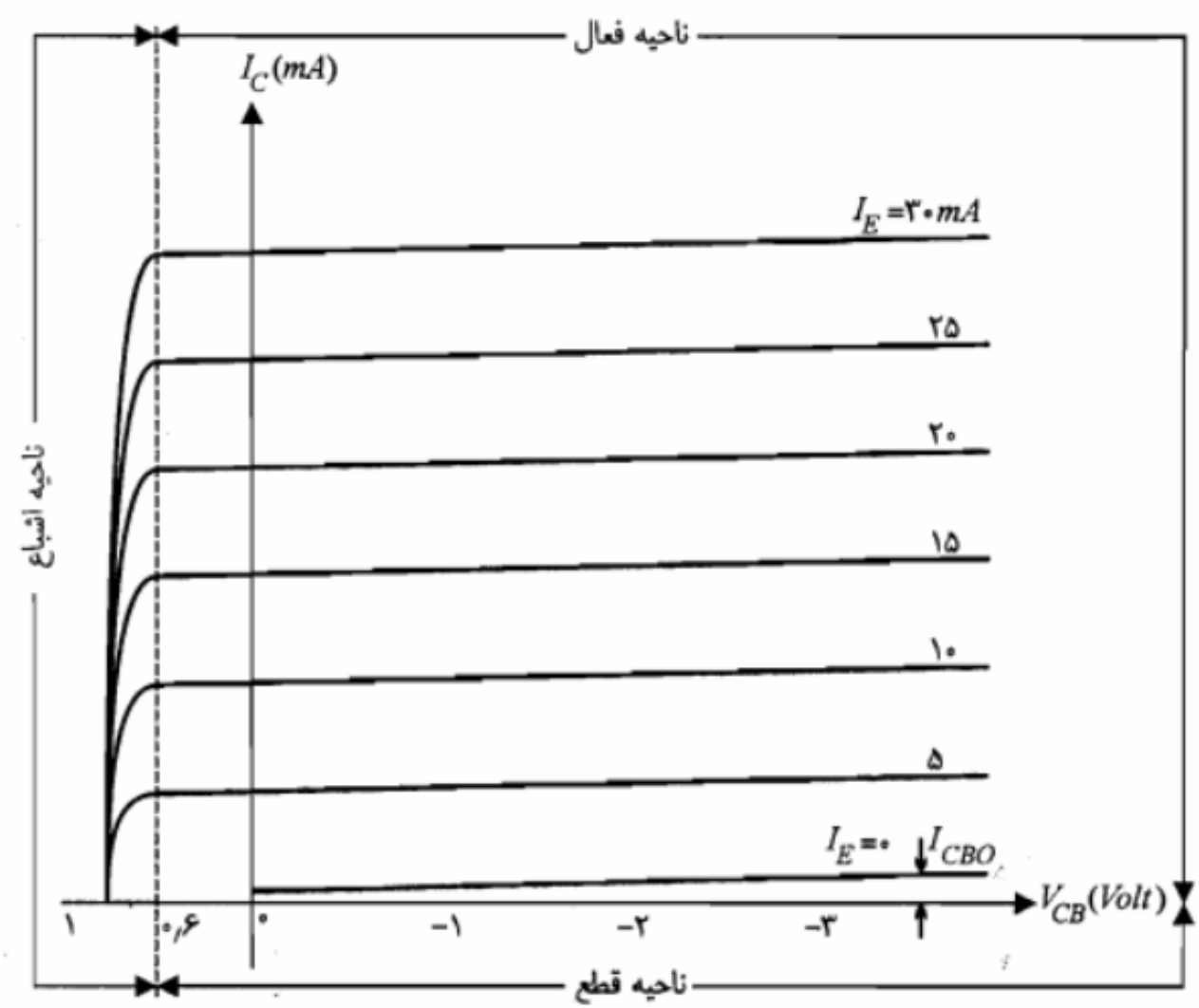


ب) ترانزیستور NPN



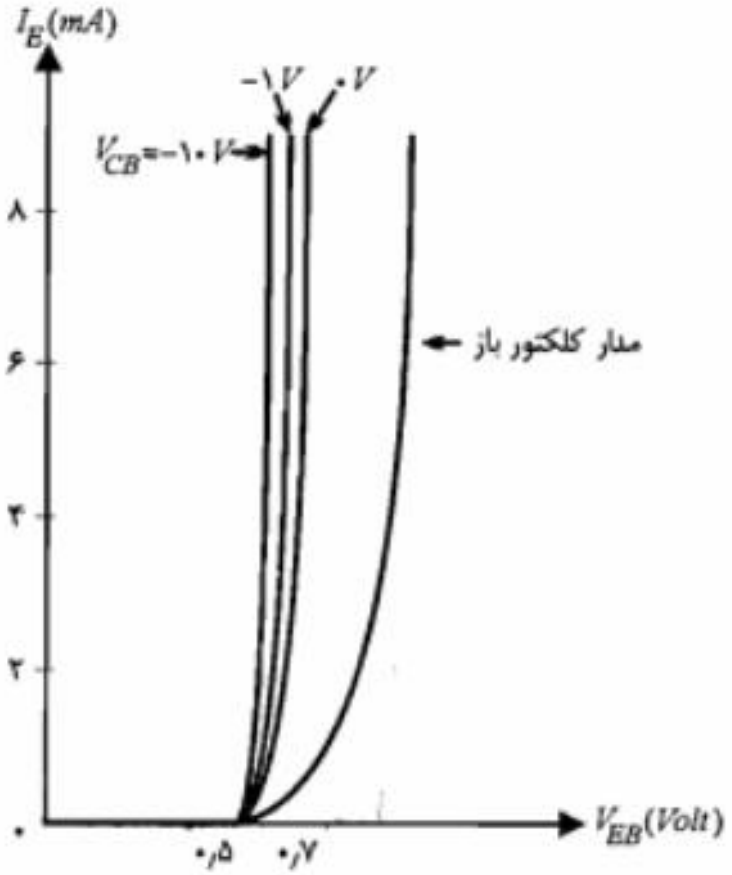
الف) ترانزیستور PNP

مشخصه خروجی ترکیب بیس مشترک



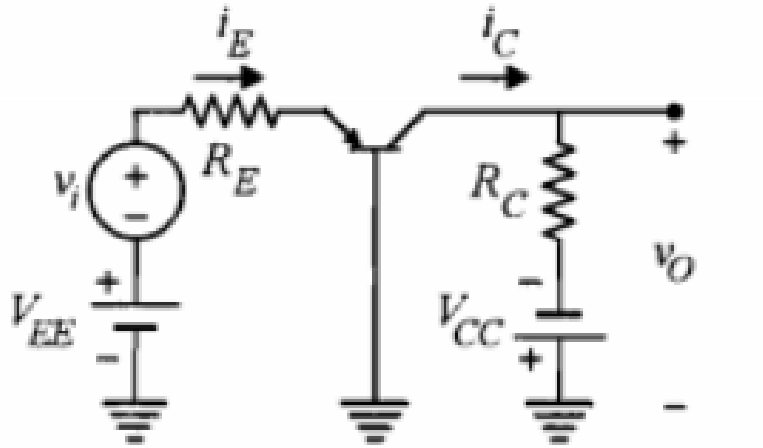
شکل ۴-۱۱: مشخصه خروجی یک ترانزیستور سیلیکن *PNP* در پیوند بیس مشترک

مشخصه ورودی
ترکیب بیس
مشترک



شکل ۴-۱۲: مشخصه ورودی یک ترانزیستور سیلیکن *PNP*

تقویت ولتاژ در ترکیب بیس مشترک



شکل ۴-۱۳: یک تقویت‌کننده ساده بیس مشترک

$$v_O = i_C R_C - V_{CC}$$

$$i_C = \alpha i_E$$

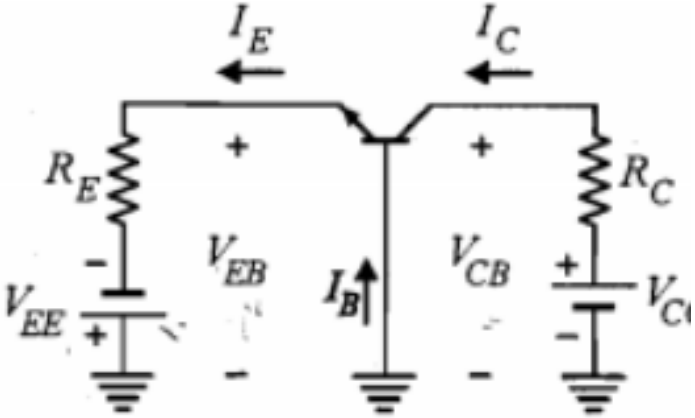
$$i_E = \frac{v_i}{R_E} + \frac{V_{EE} - V_{EB}(ON)}{R_E}$$

$$v_O = -V_{CC} + \frac{\alpha R_C}{R_E}\left[V_{EE} - V_{EB}(ON)\right] + \frac{\alpha R_C}{R_E} v_i$$

DC ac

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{\alpha R_C}{R_E}$$

مثال ۴-۱: در مدار شکل ۴-۱۰-ب، با فرض $V_{CB} = 5$، $\alpha = 0/98$، $V_{BE} = 0/7\,V$، $R_C = 4\,K\Omega$، $V_{CC} = 10\,V$ و $V_{EE} = 10\,V$، مقادیر I_C، I_E و R_E را محاسبه نمایید (فرض کنید ترانزیستور در ناحیه فعال کار می‌کند).

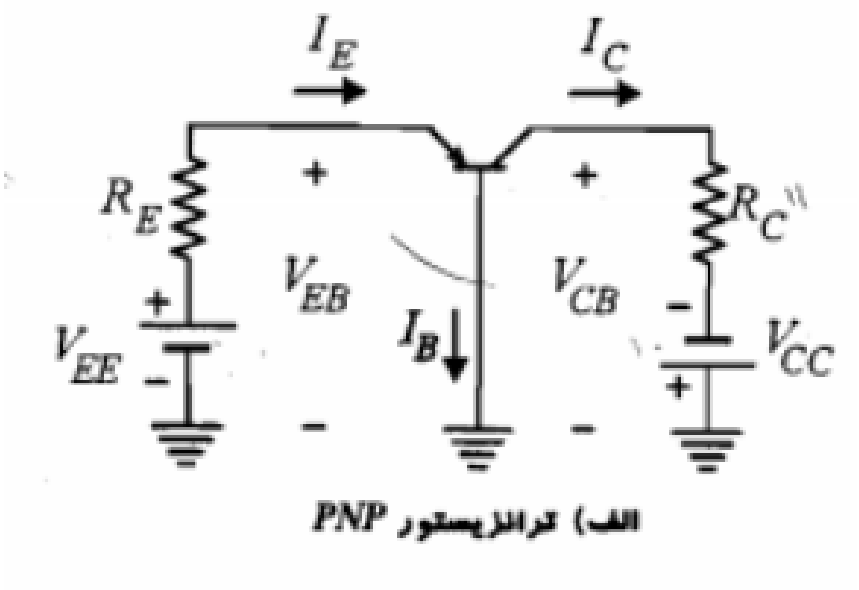


ب) ترانزیستور NPN

مثال ۴-۲: اگر در مدار شکل ۴-۱۰-الف، $R_E = ۹٫۳\,K\Omega$، $\alpha = ۰٫۹۸$، $V_{CC} = ۱۰\,V$ و $V_{EE} = ۱۰\,V$ باشد.

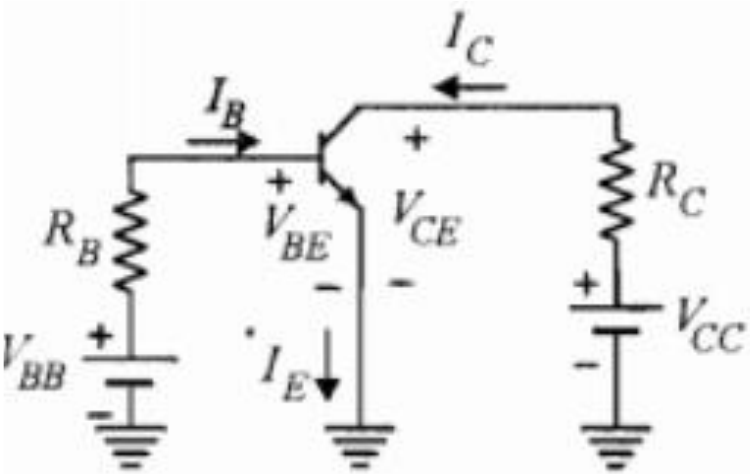
الف) با فرض $R_C = ۱۱\,K\Omega$ و $V_{EB} = ۰٫۷\,V$ آیا ترانزیستور در ناحیه فعال کار می‌کند؟ اگر جواب منفی است ناحیه کار ترانزیستور را تعیین کنید.

ب) در صورتی که $R_C = ۴\,K\Omega$ و $V_{EE} = ۰\,V$ باشد ناحیه کار ترانزیستور را تعیین کنید.

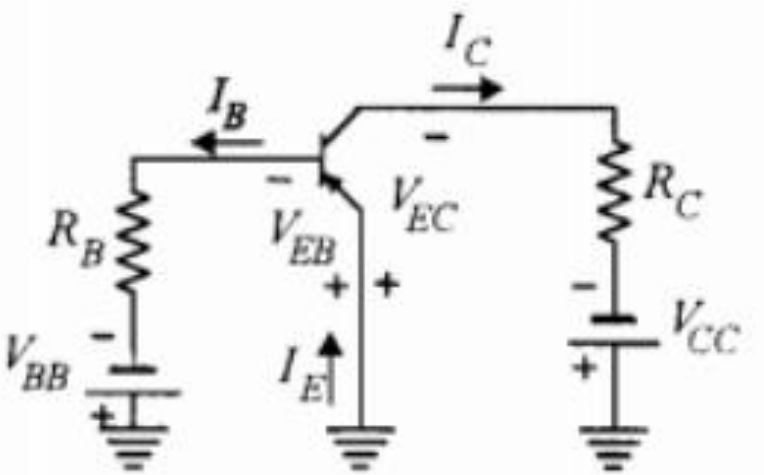


الف) ترانزیستور PNP

ترکیب امیتر مشترک

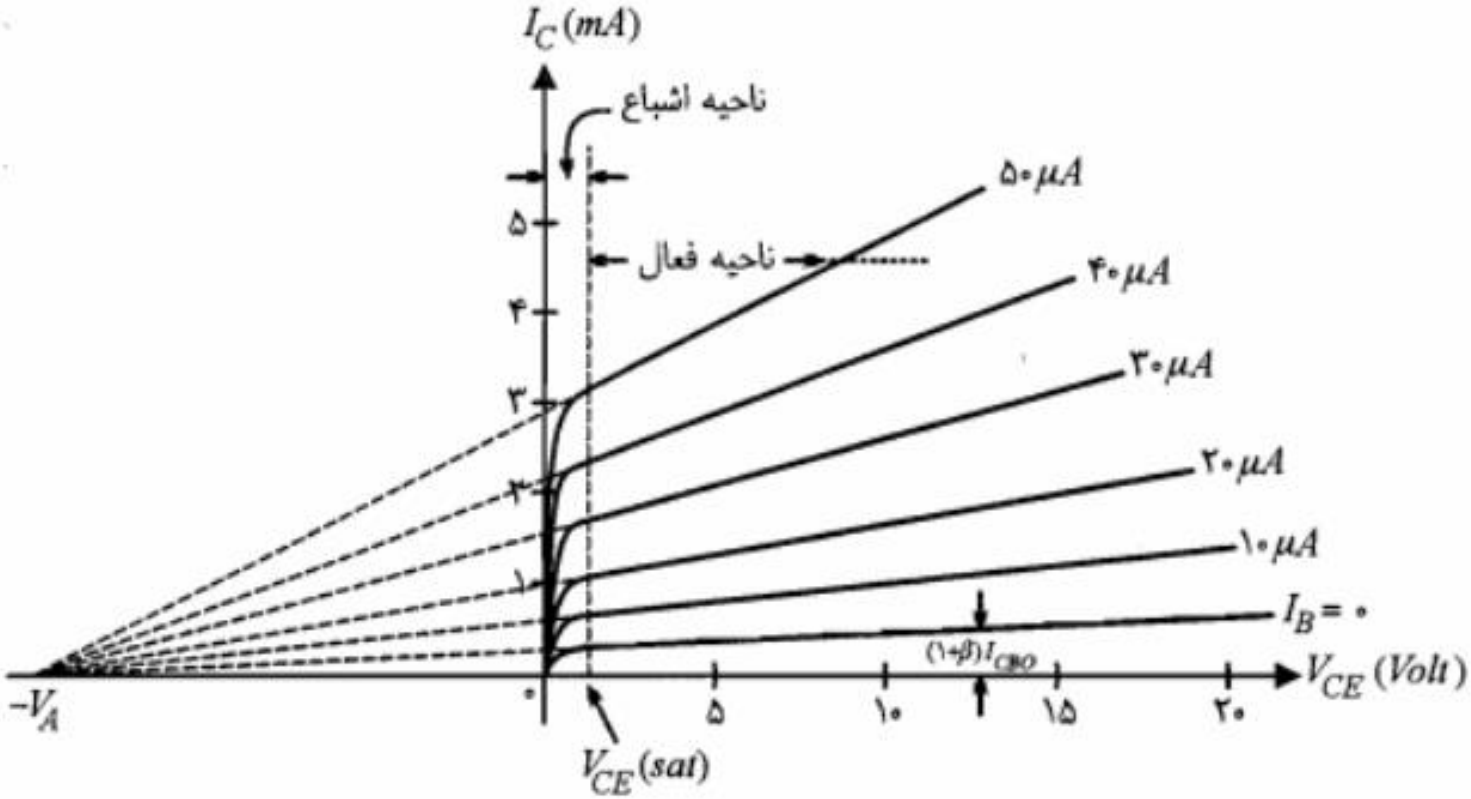


ب) ترانزیستور NPN



الف) ترانزیستور PNP

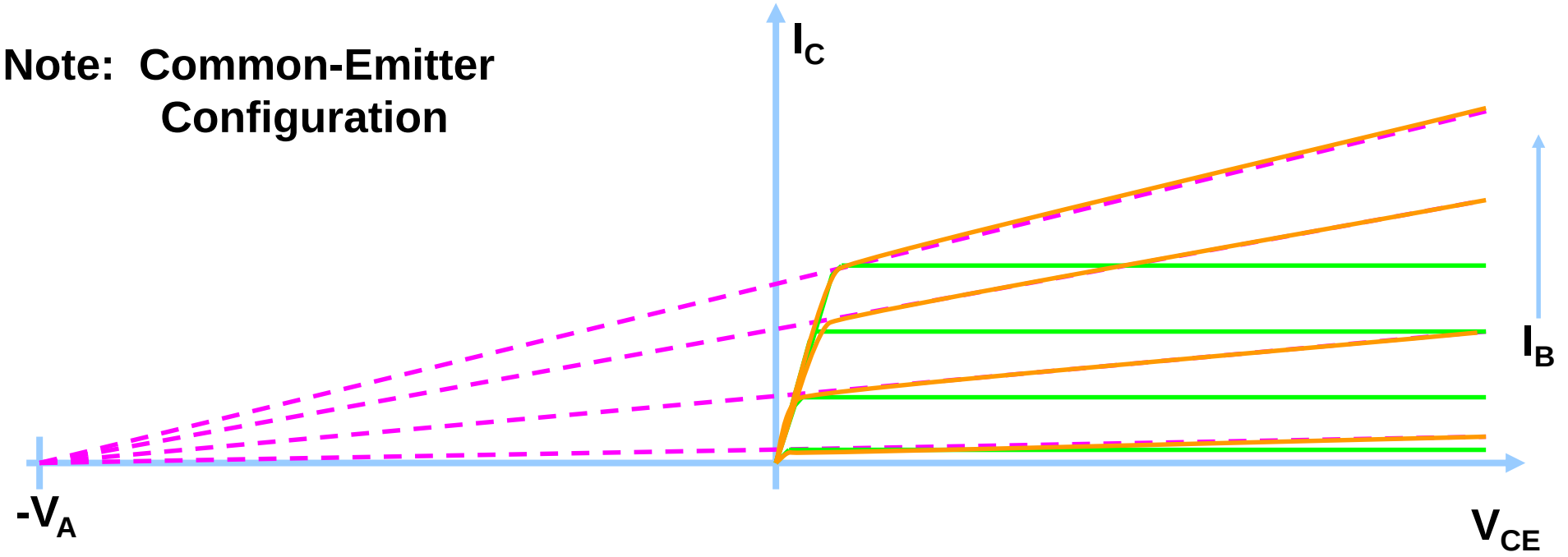
مشخصه خروجی
ترکیب امیتر
مشترک



شکل ۴-۱۵: مشخصه خروجی یک ترانزیستور سیلیکن *NPN* در مدار امیتر مشترک

The Early Effect (Early Voltage)

Note: Common-Emitter Configuration



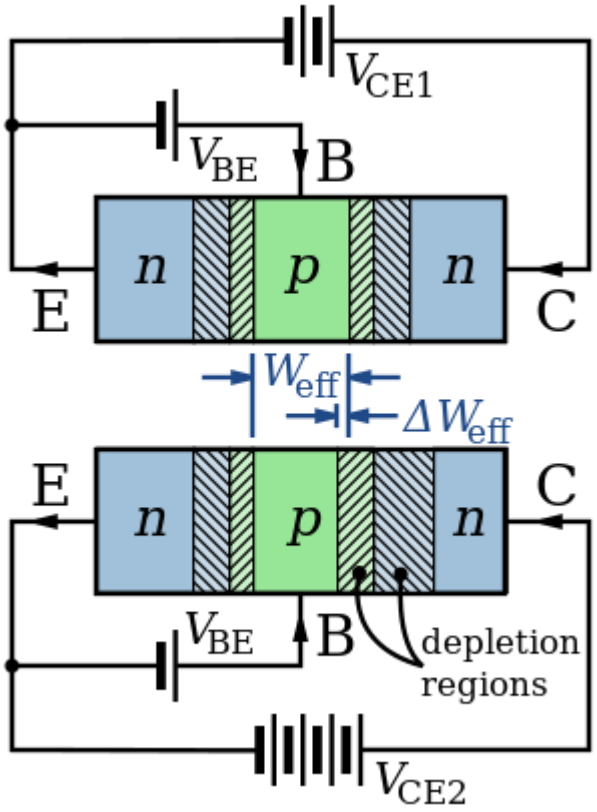
Green = Ideal I_C

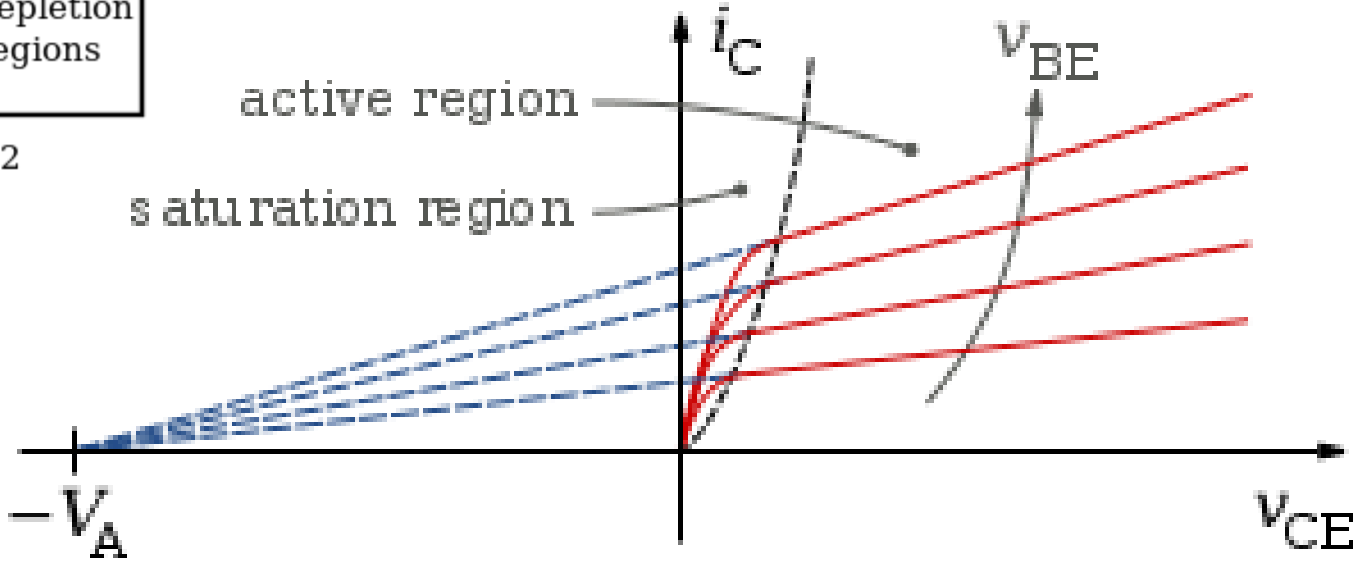
Orange = Actual I_C (I_C')

$$I_C' = I_C \left(\frac{V_{CE}}{V_A} + 1 \right)$$

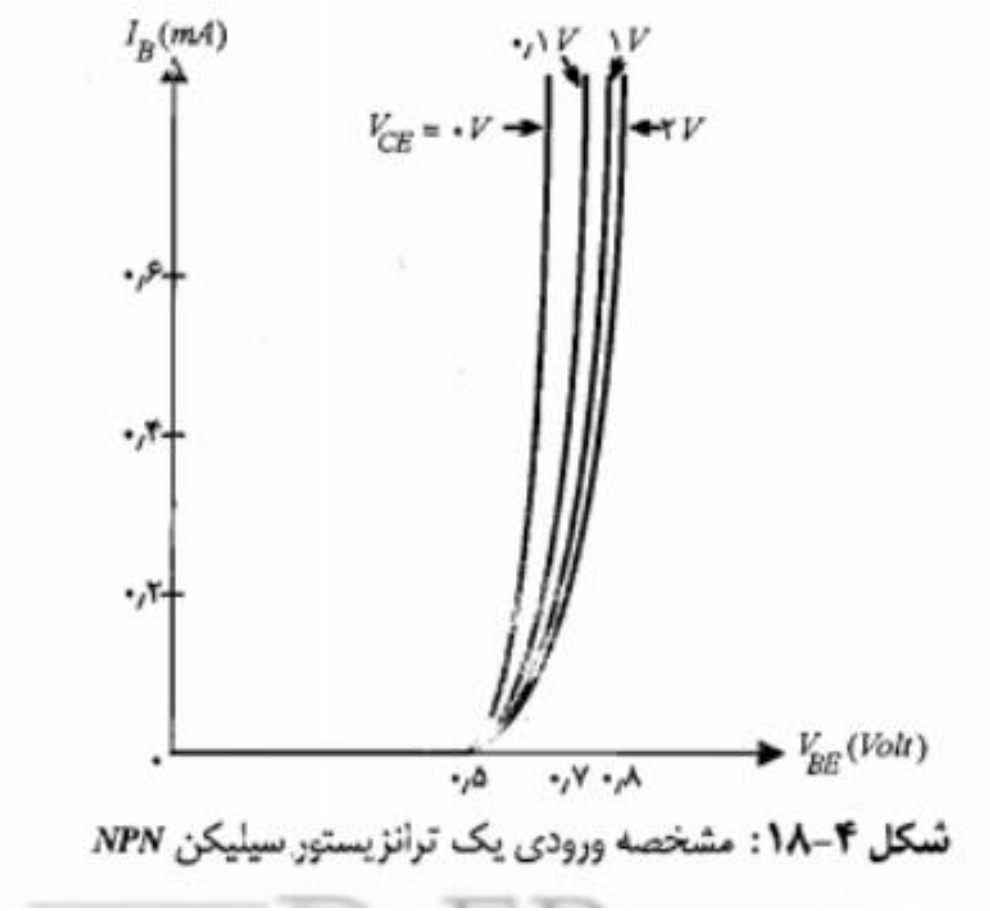
اثر ارلی یا مدولاسیون عرض بیس

اثر ارلی (به انگلیسی: Early effect)که توسط یک مهندس آمریکایی به نام James M. Early کشف شد، بیان می‌کند که عرض لایه بیس در یک ترانزیستور دو قطبی، متناسب با تغییرات ولتاژ معکوس بیس–کلکتور تغییر می‌کند. هر چقدر که ولتاژ معکوس بیس–کلکتور زیاد باشد، عرض لایه سد مابین بیس و کلکتور بیشتر شده و در نتیجه عرض لایه بیس کمتر می‌شود. به این پدیده **مدولاسیون پهنای بیس** نیز گفته می‌شود.





مشخصه ورودی ترکیب امیتر مشترک



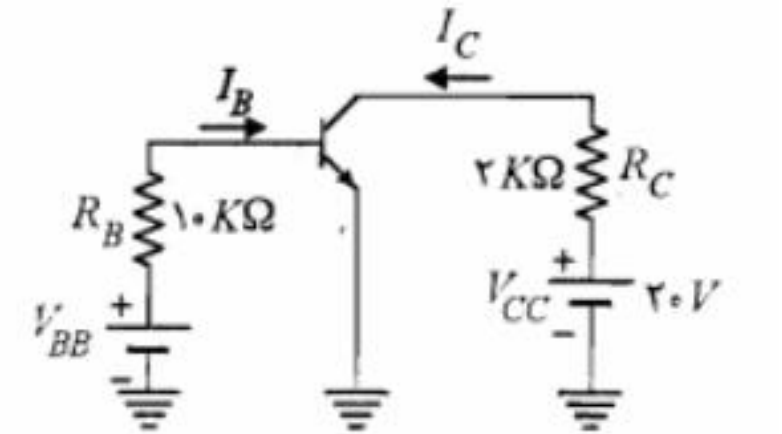
شکل ۴-۱۸: مشخصه ورودی یک ترانزیستور سیلیکن NPN

مثال ۴-۳: در مدار شکل ۴-۱۶، $V_{BE}(ON) = ۰/۷V$ و $\beta = ۱۰۰$ است.

الف) I_C و V_{CE} را به ازای $V_{BB} = ۱/۲V$ محاسبه کنید.

ب) اگر V_{BB} را تا ۲/۷ ولت افزایش دهیم، جریان I_C و ولتاژ V_{CE} چقدر می‌شوند؟

ج) مقدار حداقل V_{BB} که ترانزیستور را به اشباع می‌برد چقدر است؟

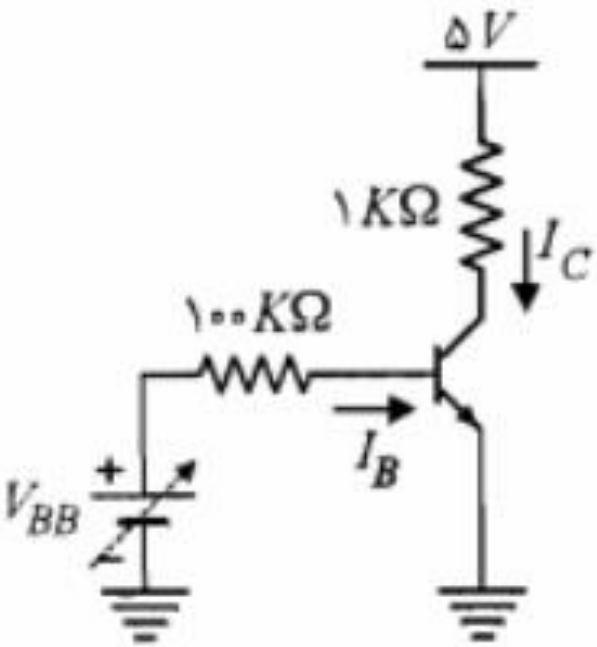


شکل ۴-۱۶: مدار مثال ۴-۳

مثال ۴-۴: مدار شکل ۴-۱۷ یک کلید ترانزیستوری را نشان می‌دهد. برای ترانزیستور به‌کار رفته $۱۰۰ < \beta < ۲۰۰$ و $I_{CBO} = ۰/۱\mu A$ است.

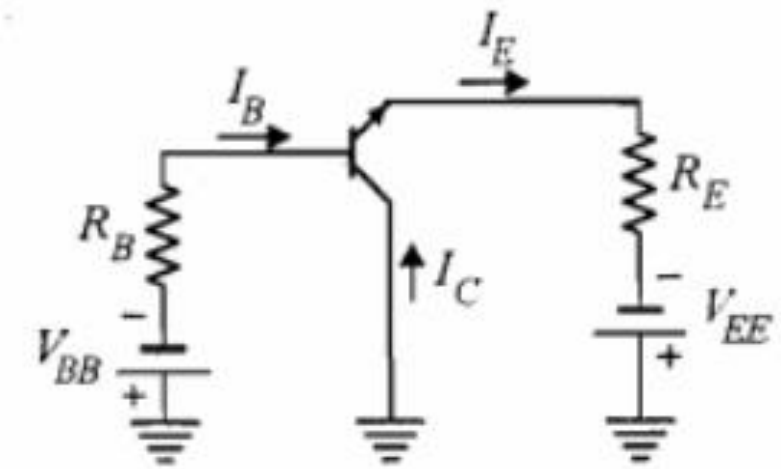
الف) حداقل جریان I_B که ترانزیستور را به حالت اشباع می‌برد چقدر است؟

ب) حداکثر ولتاژ V_{BB} که به ازای آن ترانزیستور در حالت قطع خواهد بود چقدر است؟

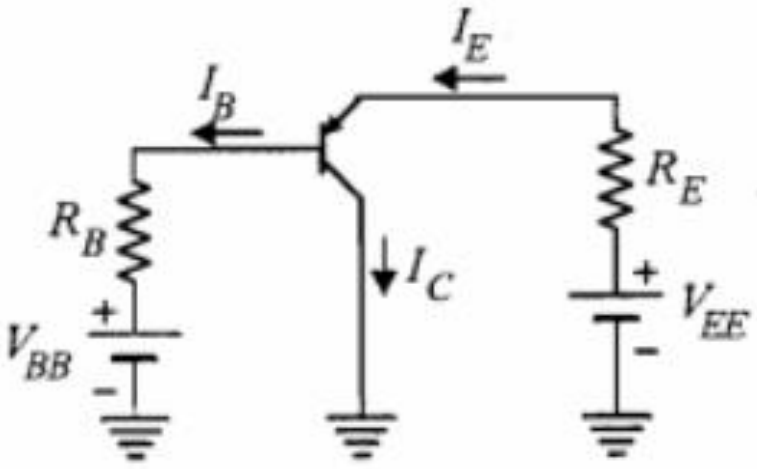


شکل ۴-۱۷: مدار مثال ۴-۴

ترکیب کلکتور مشترک



(ب) ترانزیستور NPN



(الف) ترانزیستور PNP

مقادیر نامی ترانزیستور

بررسی datasheet یک ترانزیستور و مشخص نمودن

- حداکثر جریان کلکتور
- حداکثر توان کلکتور
- حداکثر ولتاژ خروجی
- حداکثر ولتاژ ورودی
- زمان قطع
- زمان وصل