الدارات الالكترونية

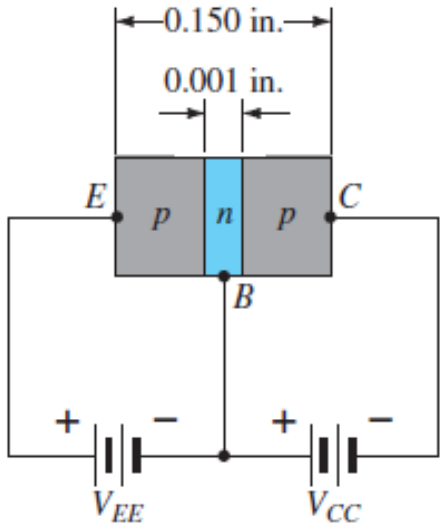
المحاضرة الخامسة

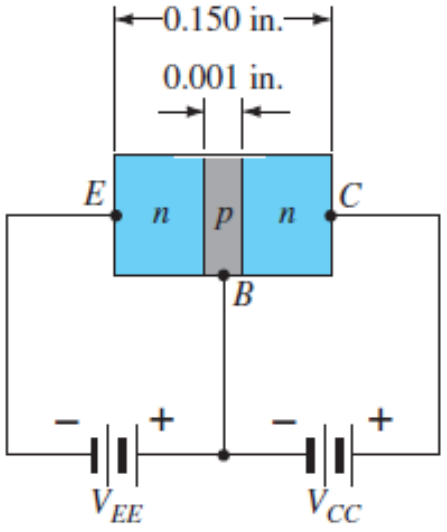
أ.د. فادي غصنه

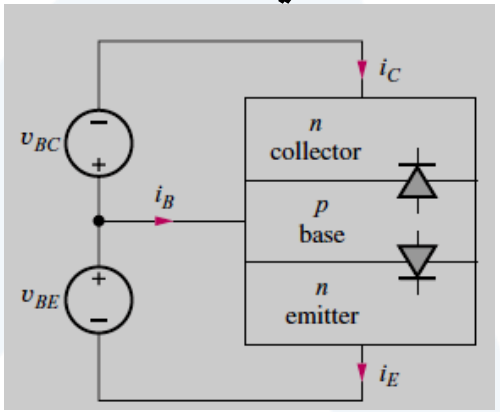
Transistor Construction

يتألف الترانزستور ثنائي القطبية bipolar junction transistor من ثلاث طبقات من عناصر نصف ناقل مشاب بنوع n ونوع p. يوجد خياران من الترانزستور BIT، إما طبقتين من نوع n، وطبقة من النوع p، ويدعى ترانزستور ثنائي القطبية npn transistor، أو طبقتين من نوع P، وطبقة من النوع n، ويُدعى ترانزستور pnp transistor.

تُدعى نهايات الترانزستور الباعث (emitter) E، المجمع (collector) C، القاعدة (base) B. تشاب منطقة الباعث بشكل مكثف، بينما يُشاب المجمع والقاعدة بشكل خفيف. الطبقات الخارجية (منطقة الباعث ومنطقة المجمع) E,C تكون أعرض من منطقة القاعدة B بنسبة تقريبية 150:1.

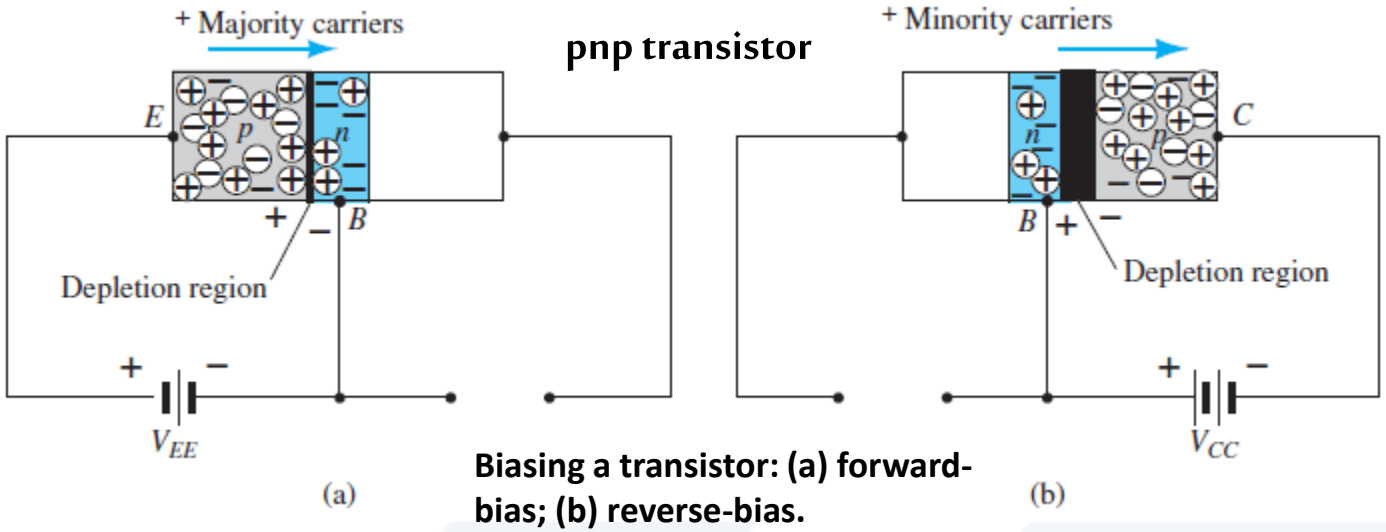






Types of transistors: pnp; npn.

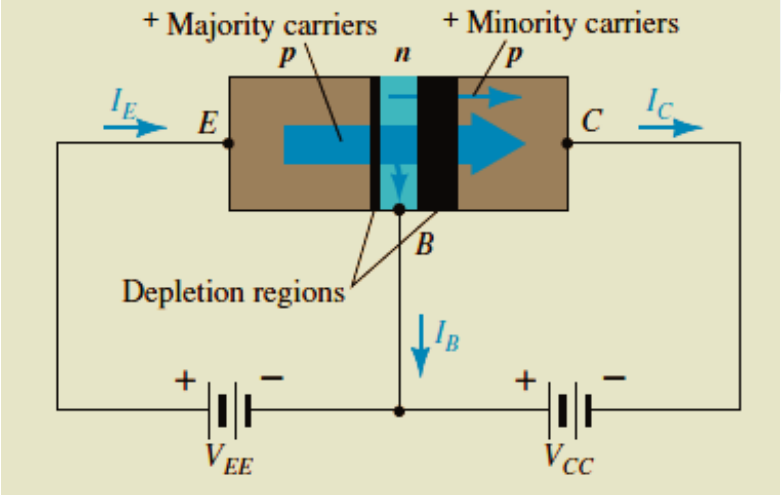
Transistor Operation



Biasing a transistor: (a) forward-bias; (b) reverse-bias.

كما هو واضح فإن كل ترانزستور مكون من وصلتي pn. بالتالي يوجد أربع خيارات لانحياز الترانزستور. فعلى سبيل المثال، كما هو مبين في الشكل أعلاه، فإن وصلة الباعث-قاعدة بانحياز أمامي، ووصلة المجمع-قاعدة بانحياز عكسي، يسمى هذا الانحياز للترانزستور بالنمط الفعال active mode.
يبين الشكل (a) الانحياز الأمامي لوصلة الباعث-قاعدة، بالتالي عرض المنطقة المحرمة صغير جداً، مما يؤدي لمرور تيار الحوامل الأكثرية، بينما وصلة المجمع-قاعدة بانحياز عكسي، بالتالي عرض المنطقة المحرمة كبير، مما يؤدي إلى أن التيار المار الناتج عن الحوامل الأكثرية يساوي الصفر، فقط تيار الحوامل الأقلية هو الذي يمر.

Transistor Operation



عند تطبيق الانحياز كما هو مبين في الشكل، فإن تدفق لحوامل الشحن الأكثرية والأقلية يظهر كما في الشكل.

بما أن وصلة باعث-قاعدة في حالة انحياز أمامي، فإن حوامل الشحنة الأكثرية (الثقوب) سوف تنتشر من المنطقة نوع p إلى المنطقة نوع n. جزء من هذه الثقوب سوف يتحد مع الكترونات المنطقة نوع n، والجزء الأعظمي سوف ينتشر إلى منطقة المجمع (المنطقة نوع p) وعبر المنطقة المحرمة لوصلة مجمع-قاعدة المنحازة عكسياً. سبب انتشار الثقوب من المنطقة n (منطقة القاعدة) إلى المنطقة نوع p (المجمع)، كونها تصبح حوامل أقلية في وصلة مجمع-قاعدة المنحازة عكسياً.

وكما هو معلوم فإن حوامل الشحنة الأقلية هي التي تساهم في وجود التيار في حالة الانحياز العكسي. يقوم الباعث (المنطقة نوع p) بدور حاقن للثقوب ضمن القاعدة (المنطقة نوع n).

بما أن القاعدة موصلة مع القطب السالب لمنبع الجهد، يقوم المنبع بحقن الالكترونات ضمن القاعدة (المنطقة نوع n)، قسم من هذه الالكترونات يتحد مع الثقوب في هذه المنطقة، والقسم الآخر ينتشر إلى منطقة الباعث بسبب الانحاز الأمامي لوصلة باعث-قاعدة.

يظهر اتجاه تيارات الباعث والقاعدة والمجمع كما هو مبين في الشكل، وبتطبيق قانون كيرشوف للتيار، ينتج: $I_E = I_C + I_B$

تيار القاعدة صغيرا جدا من مرتبة ميكرو أمبير، بينما تيار الباعث وتيار المجمع من مرتبة الميلي أمبير.

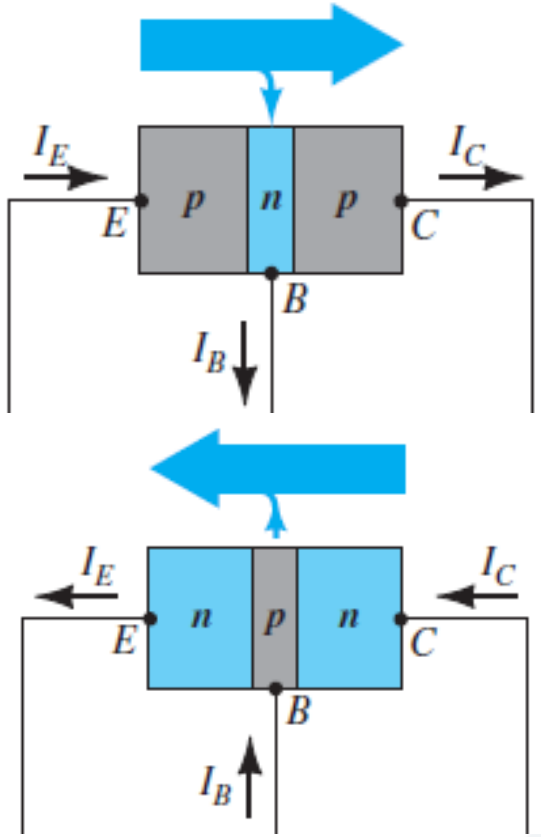
Bipolar Junction Transistor

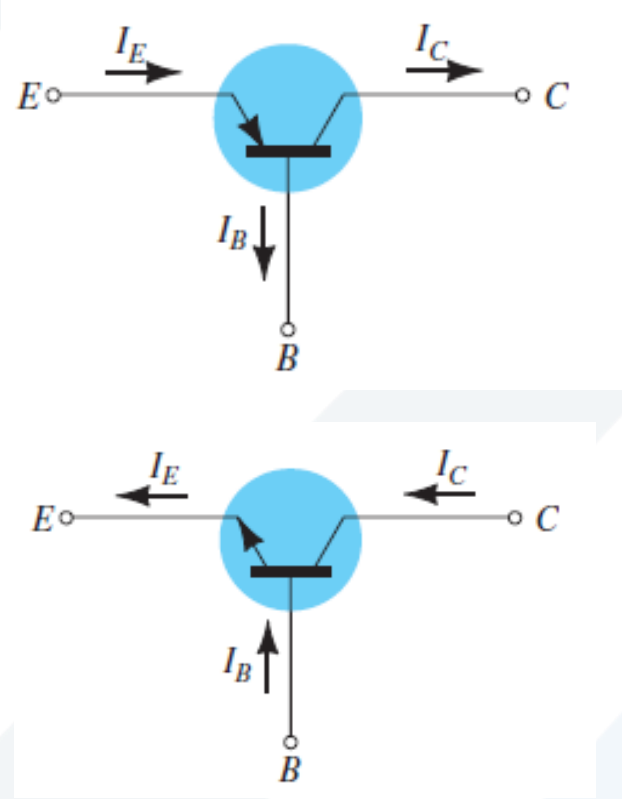
ينتج تيار المجمع من مجموع تيارين: تيار ناتج عن الحوامل الأكثرية (الثقوب)، وتيار ناتج عن الحوامل الأقلية، الذي يُسمى بتيار التسريب leakage current، ويُرمز بالرمز ICO (تيار صغير جداً) – تيار المجمع من أجل باعث مفتوح:

$$I_C = I_{C_{\text{majority}}} + I_{CO_{\text{minority}}}$$

يمكن تفسير عمل الترانزستور npn فيزيائياً بشكل مشابه للترانزستور pnp.

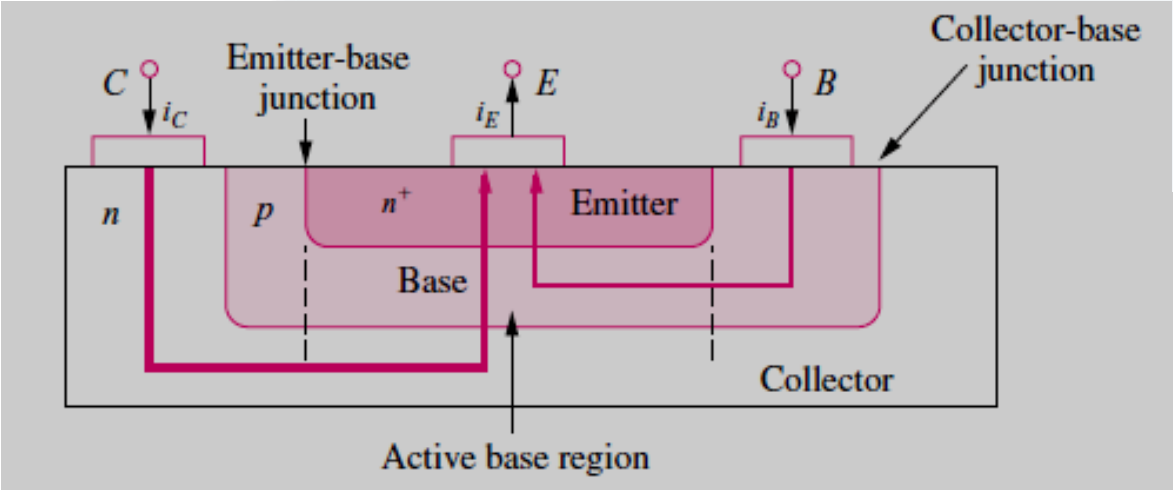
يظهر الرمز الالكترونية للترانزستور pnp والترانزستور npn كما في الشكل، مع اتجاه التيارات. يشير الرمز ضمن الرمز الالكتروني للترانزستور إلى اتجاه تيار الباعث IE.



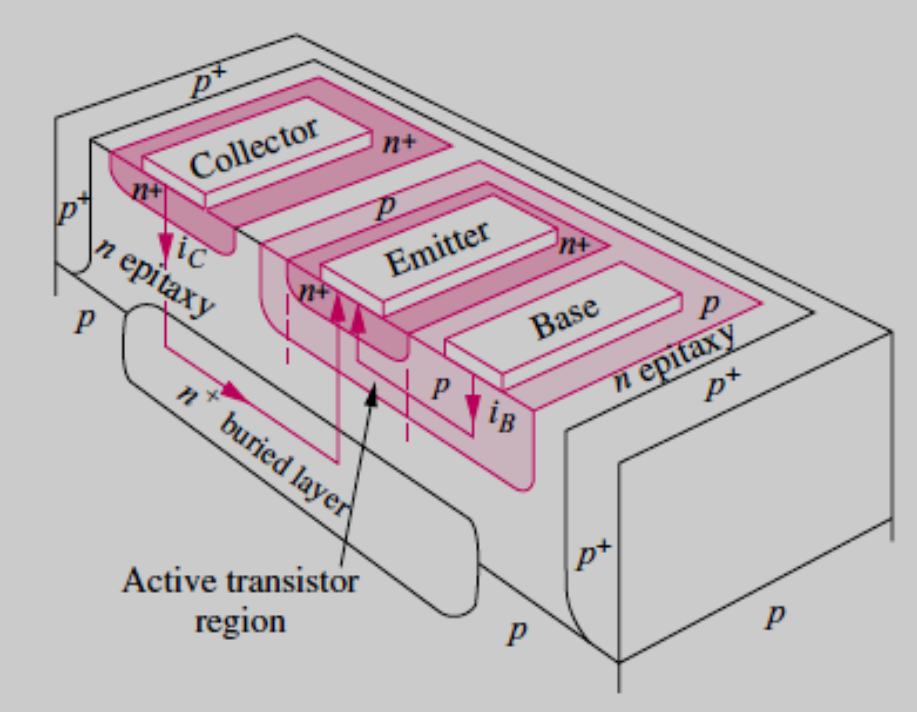


يجب الانتباه أن اتجاه التيارات متوافق مع اتجاه حركة الثقوب للترانزستور.

Bipolar Junction Transistor

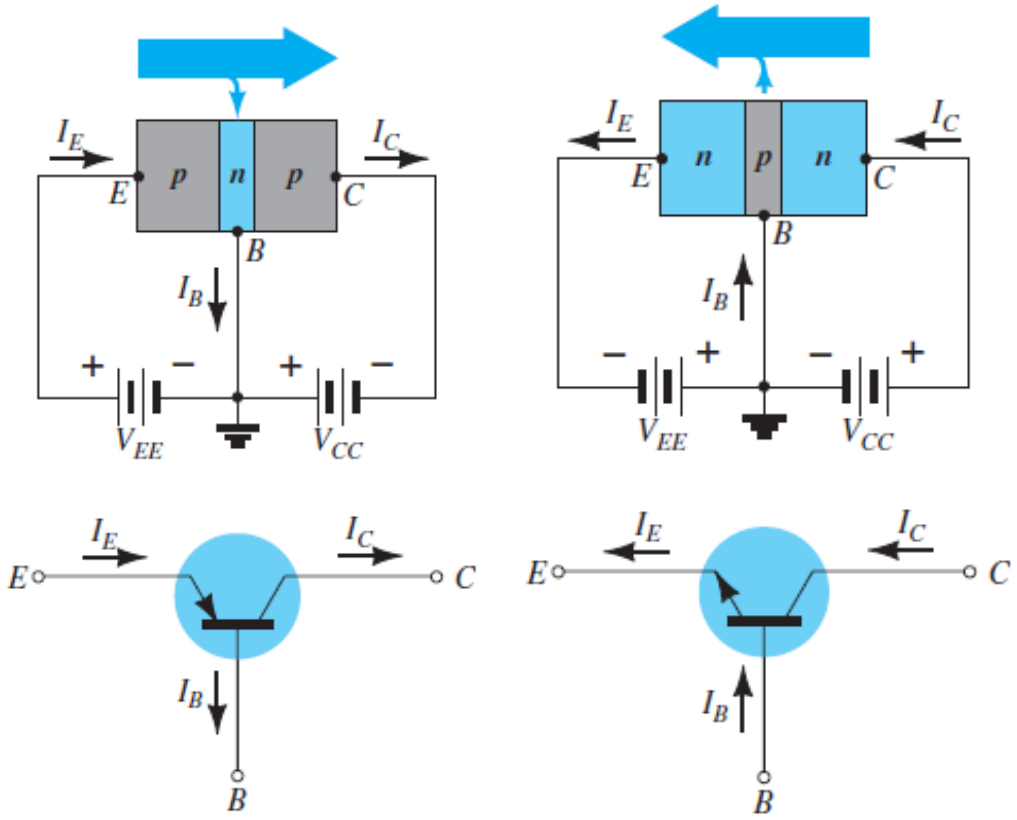


مقطع عرض مبسط للترانزستور npn مع اتجاه التيارات في حالة نمط العمل الطبيعي.



منظر ثلاثي البعد للترانزستور npn.

Common-base Configuration



Notation and symbols used with the common-base configuration: (a) pnp transistor; (b) npn transistor.

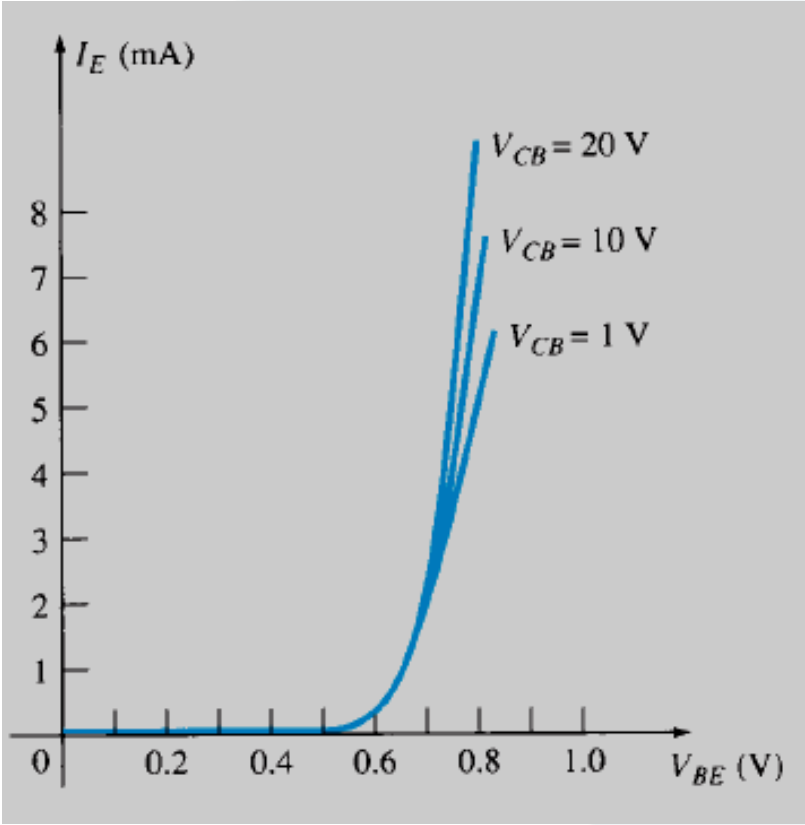
يشير مصطلح الوصلة المشتركة common junction إلى نهاية الترانزستور (pnp, pnp)، التي تكون مشتركة بين دارتي الدخل والخرج للترانزستور، وتوصل هذه النهاية إلى نقطة الأرضي.

يبين الشكل دارة ترانزستور مع وصلة القاعدة المشتركة common-base.

$$I_E = I_C + I_B$$

تشكل بارامترات دارة الدخل بالنسبة لوصلة القاعدة من تيار الباعث I_E والجهد V_{BE} ، بينما تشكل بارامترات دارة الخرج من تيار المجمع I_C، والجهد V_{CB}.

مميزة دارة الدخل



كما هو معلوم فإن وصلة باعث-قاعدة في حالة الانحياز الأمامي، لذلك يُعطى تيار الباعث بالعلاقة الآتية: (بشكل مشابه لحالة الانحياز الأمامي للمتصل الثنائي).

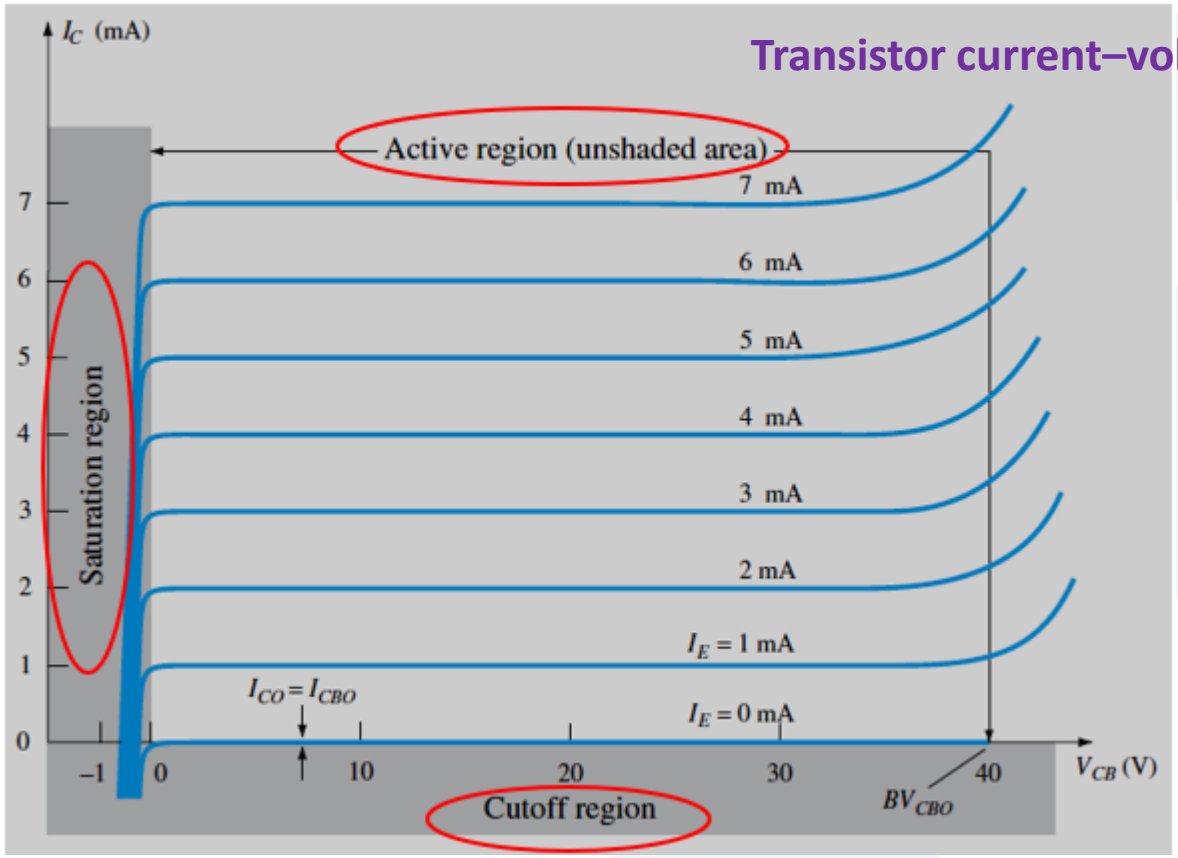
$$i_E = I_{EO}[e^{v_{BE}/V_T} - 1] \cong I_{EO}e^{v_{BE}/V_T}$$

لاحظ تأثير الجهد VCB على المميزة صغير جداً، لذلك سيهمل أثناء تحليل دارات الترانزستور.

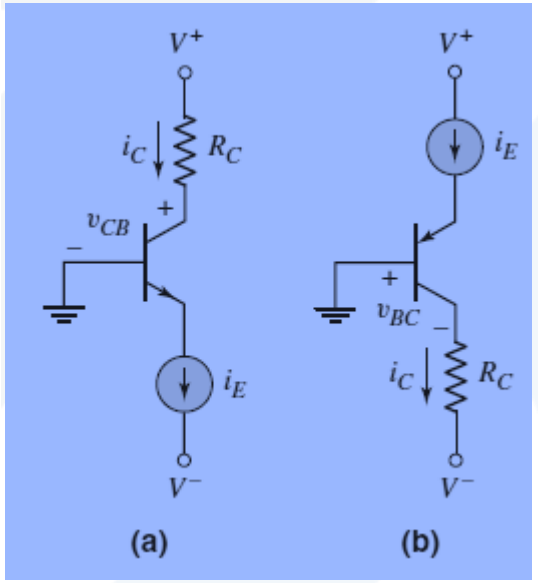
Input or driving point characteristics for a common-base silicon transistor amplifier.

مميزة دارة الخرج

Transistor current–voltage characteristics of the common-base circuit



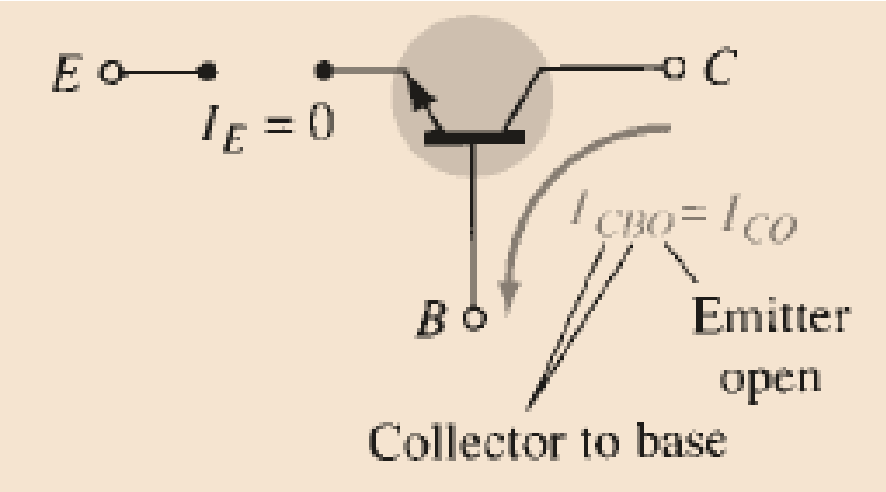
مميزة الخرج بين تيار المجمع وجهد V_{BE} من أجل قيم لتيار الباعث I_E.



Common-base circuit configuration with constant current source biasing: (a) an npn transistor and (b) a pnp transistor

Common-base Configuration

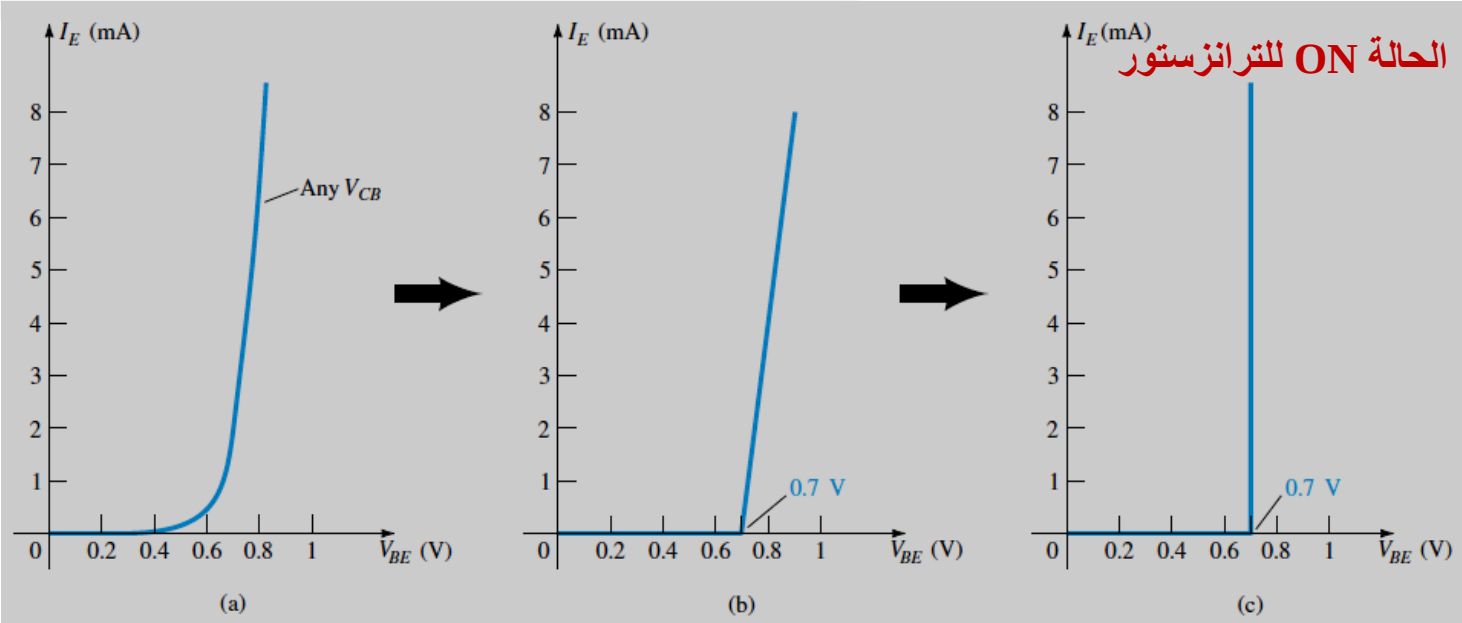
- تظهر في مميزة الخرج ثلاثة مناطق:
- المنطقة الفعالة active region وهي المنطقة التي يعمل فيها الترانزستور كمضخم إشارة، وتُسمى المنطقة الخطية. تكون وصلة الباعث-قاعدة في حالة انحياز أمامي، ووصلة مجمع-قاعدة في حالة انحياز عكسي. على الحدود السفلية لهذه المنطقة يكون تيار الباعث مساوياً للصفر. وتيار المجمع مساوياً للتيار I_{CO} (صغير جداً من مرتبة ميكرو أمبير) لذلك يمكن إهماله في معظم التطبيقات. كما هو ملاحظ من مميزة الخرج، فإن تيار المجمع I_C يزاد مع زيادة تيار الباعث I_E، وبإهمال تأثير تيار القاعدة الصغير جداً، ينتج:



$$I_C \cong I_E$$

- منطقة القطع Cut-off region، يكون فيها كل من وصلة باعث-قاعدة ووصلة مجمع-قاعدة في حالة انحياز عكسي، $I_C = 0$.
- منطقة الاشباع saturation region، يكون فيها كل من وصلة باعث-قاعدة ووصلة مجمع-قاعدة في حالة انحياز أمامي، V_{CB}.

مميزة دارة الدخل



مميزة الدخل من أجل الحالة الفعلية للترانزستور (a)، الحالة الخطية مع ميل في المميزة – حالة اعتبار المقاومة (b)، الحالة المثالية لترانزستور مصنوع من السيلكون – إهمال المقاومة (c).

يكون الجهد VBE مساوياً إلى: (حالة انحياز أمامي أو الحالة ON).

$$V_{BE} \cong 0.7\ \text{V}$$

يجب أن يطبق جهد بين القاعدة - باعث أكبر من 0.7 V حتى ينتقل الترانزستور إلى الحالة ON،

Alpha (α)

- عند تحليل دارات الترانزستور، يجب أن نميز بين التحليل المستمر DC، والتحليل المتناوب AC.
- سيكون للترانزستور نموذج خاص من أجل التحليل المستمر DC، ونموذج خاص من أجل التحليل المتناوب AC.
- من أجل نموذج التحليل المستمر DC Model، ستُعرف النسبة بين تيار المجمع I_C وتيار الباعث I_E من أجل الحوامل الأكثرية بالرمز α:

$$\alpha_{dc} = \frac{I_C}{I_E}$$

- في معظم الترانزستورات العملية تؤخذ قيمة α = 1 (تذكر علاقة المساواة التقريبية بين التيارين I_C و I_E). لكن القيمة الفعلية لـ α يؤخذ بين 0.998 – 0.90، وتُعطى بالعلاقة الآتية:

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

- بالنسبة للتحليل المتناوب، تُعطى α بالعلاقة الآتية:

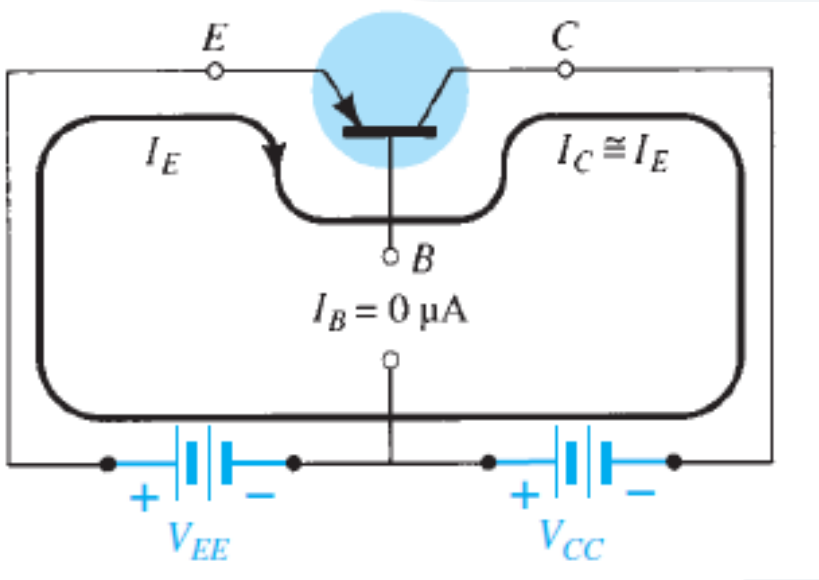
$$\alpha_{ac} = \left.\frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}\right|_{V_{CB}=\text{constant}}$$

- يُسمى α بمعامل ربح الدارة المقصورة لوصلة القاعدة المشتركة، أو ربح التيار العكسي.

common-base , short-circuit , amplification factor

Biasing

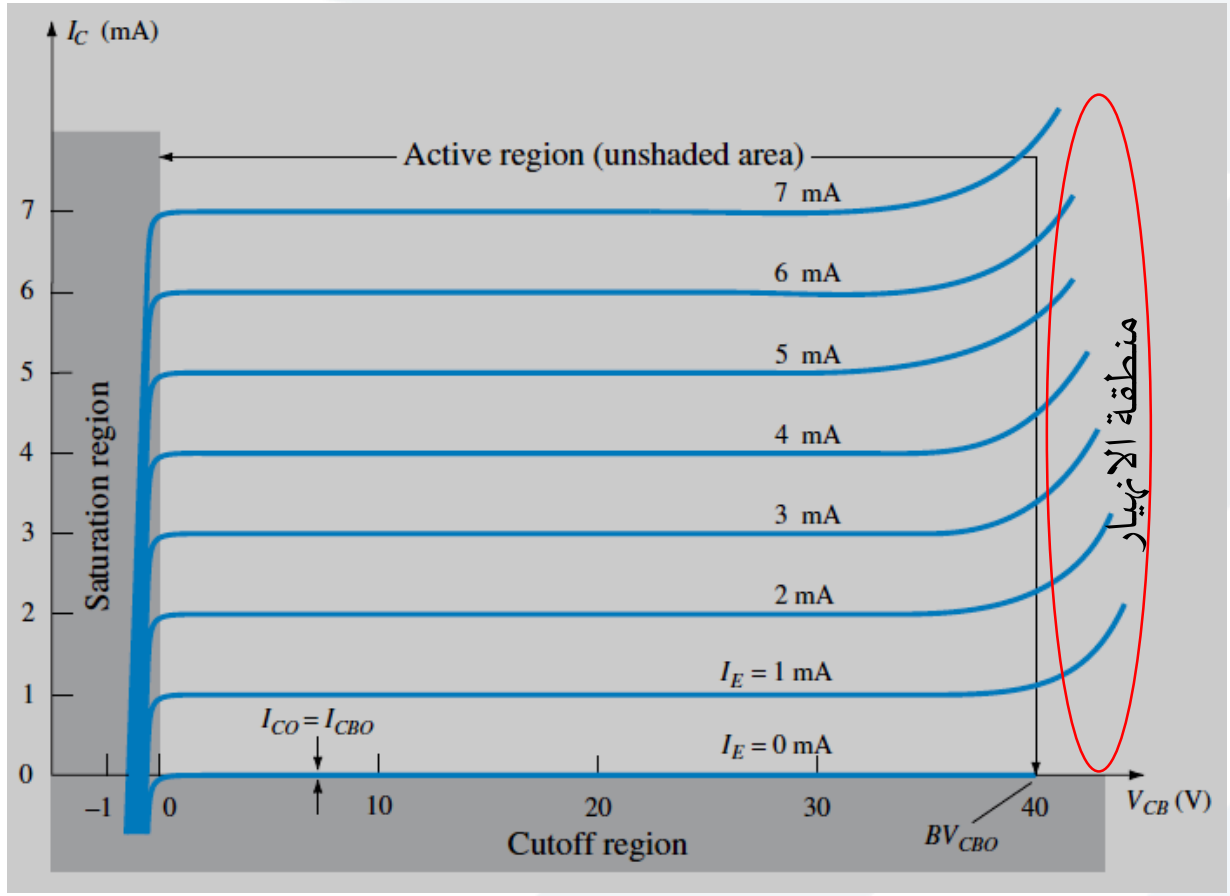
تحييز وصلة القاعدة المشتركة ضمن المنطقة الفعالة، يمكن انجازه بسرعة من خلال جعل $I_C \cong I_E$، وفرض أن $I_B \cong 0$. يوضح الشكل تحييز وصلة القاعدة المشتركة ضمن المنطقة الفعالة من أجل ترانزستور pnp. يُرجى الانتباه إلى اتجاه التيارات، وقطبية منابع الجهد المستمرة DC. بالنسبة لترانزستور npn سيكون اتجاه التيارات وقطبية نابع الجهد معاكساً لما هو مبين في الشكل.



Establishing the proper biasing management for a common-base pnp transistor in the active region.

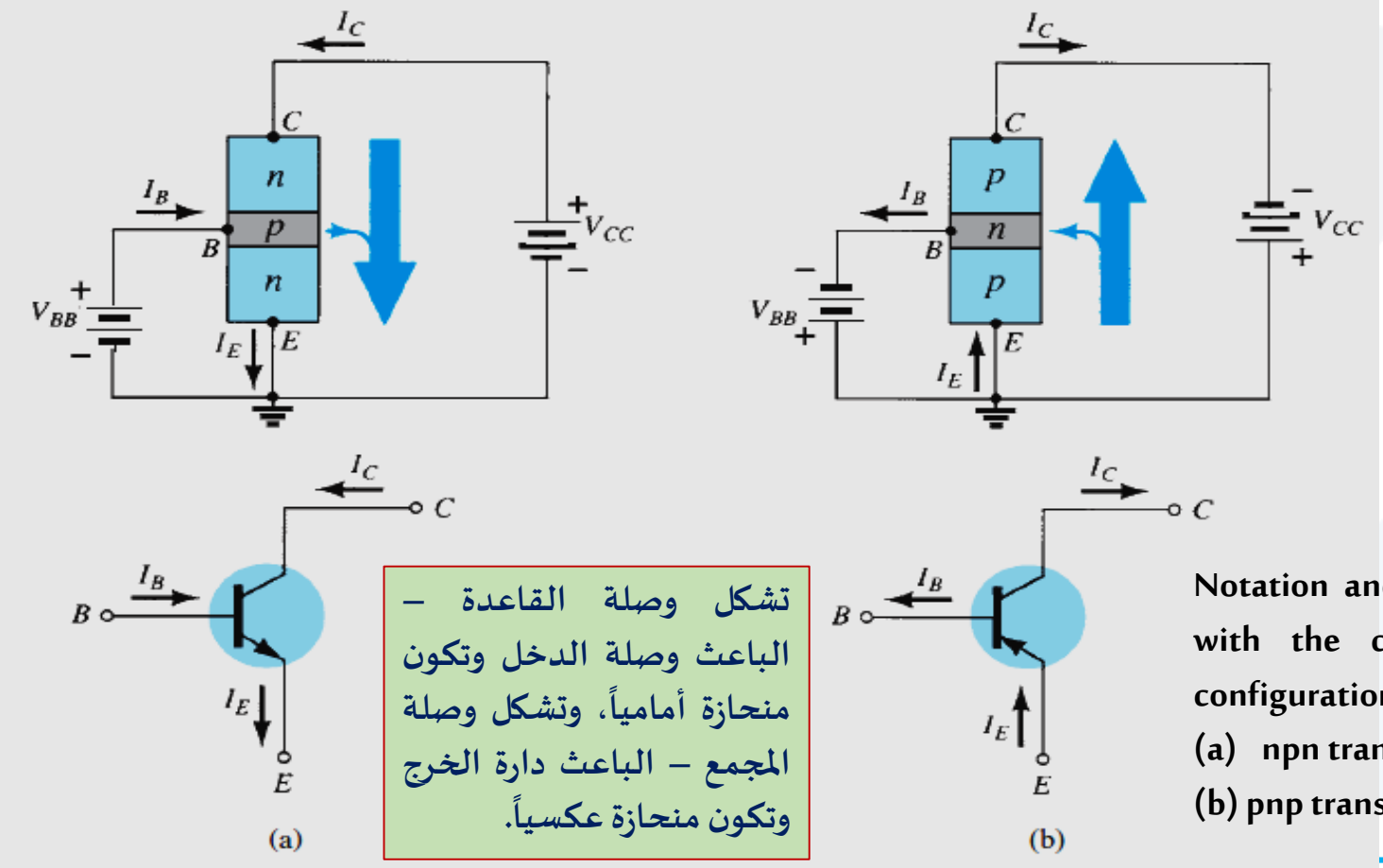
للحفظ: يشير سهم ترانزستور pnp إلى المصطلح pointing in. بالنسبة لترانزستور npn يشير المصطلح إلى not pointing in.

Breakdown Region



كما أصبح معلوماً أن وصلة المجمع – القاعدة منحازة عكسياً، عند زيادة الجهد V_{CB} حتى نقطة معينة، BV_{CBO}، يزداد التيار بشكل كبير، عند زيادة صغيرة في جهد المجمع – القاعدة V_{CB}، أي عند هذه النقطة ينهار الترانزستور، بشكل مشابه لانهيار المتصل الثنائي عند زيادة الجهد العكسي المطبق على طرفي المتصل الثنائي.

Common-emitter Configuration

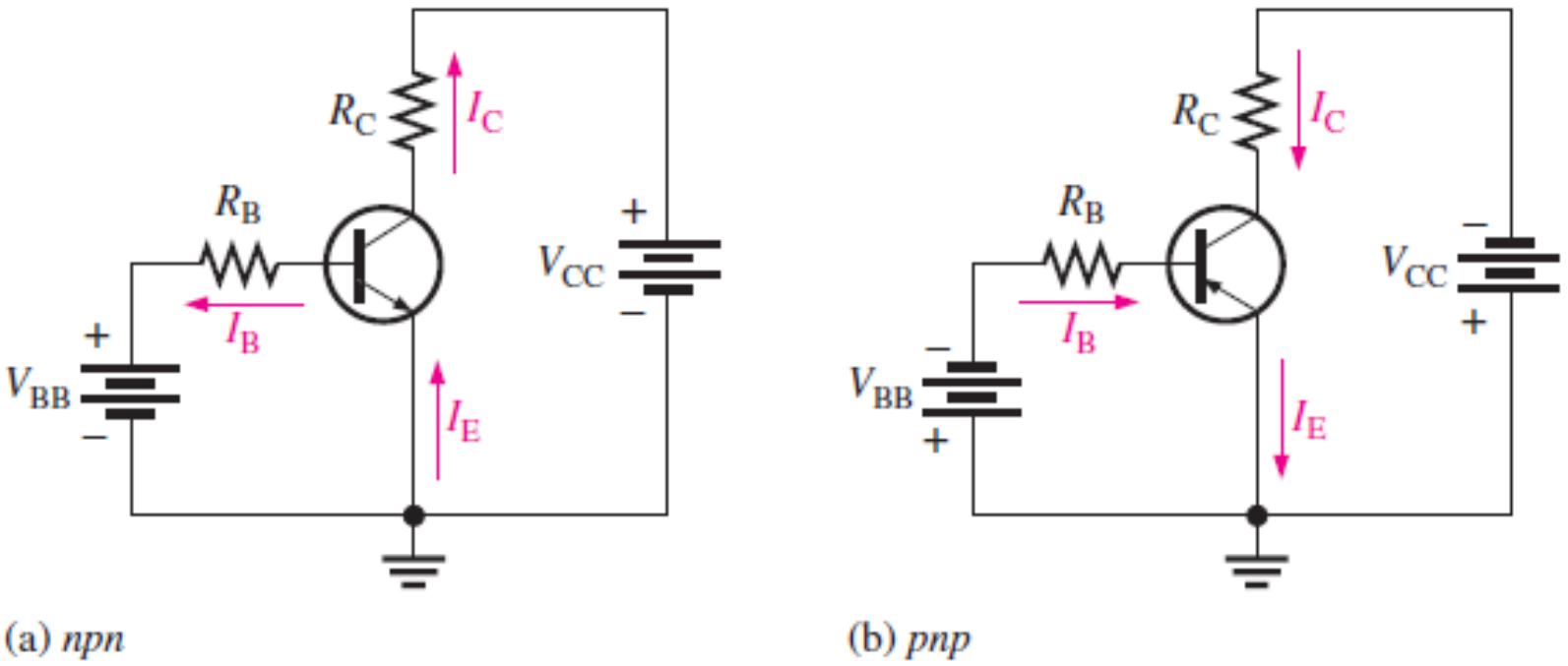


تشكل وصلة القاعدة – الباعث وصلة الدخل وتكون منحازة أمامياً، وتشكل وصلة المجمع – الباعث دارة الخرج وتكون منحازة عكسياً.

Notation and symbols used with the common-emitter configuration:
(a) npn transistor;
(b) pnp transistor.

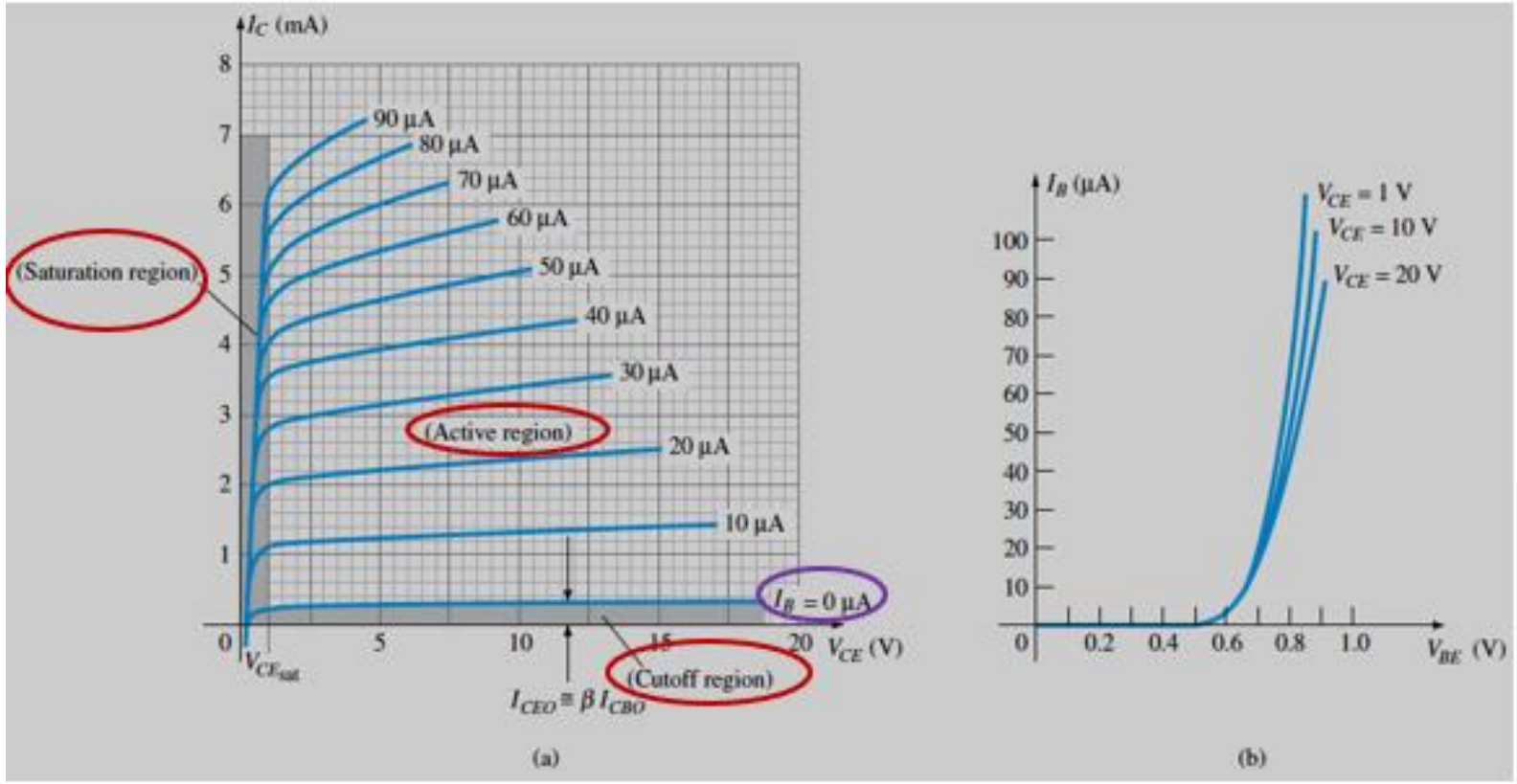
تُعدّ وصلة الباعث المشترك الوصلة الأكثر شيوعاً واستخداماً، حيث يكون الباعث النقطة المشتركة بين دارة الدخل ودارة الخرج، والنقطة الموصولة إلى الأرضي.

Common-emitter Configuration



Transistor dc bias circuits.

مميزة الدخل ومميزة الخرج لوصلة الباعث المشترك



Characteristics of a silicon transistor in the common-emitter configuration: (a) collector characteristics; (b) base characteristics.

Common-emitter Configuration

كما هو الحال بالنسبة لوصلة القاعدة المشتركة، فإن العلاقة بين التيارات تبقى صالحة بالنسبة لوصلة الباعث المشترك، أي $I_E = I_C + I_B$، و $I_C = \alpha I_E$.

تُعطي مميزة الخرج العلاقة بين تيار المجمع I_C (تيار الخرج) وجهد الخرج المجمع - الباعث V_{CE}، من أجل قيم مختلفة لتيار القاعدة I_B. أما مميزة الدخل فتُعطى من خلال العلاقة بين تيار الدخل I_B (تيار القاعدة)، وجهد الدخل V_{BE} (جهد القاعدة – الباعث) من أجل قيم مختلفة لجهد الخرج V_{CE}.

كما هو ملاحظ من مميزة الخرج بالنسبة لقيمة ثابتة لتيار الدخل I_B، فإن تيار المجمع I_C يزداد زيادة طفيفة مع زيادة جهد الخرج V_{CE} (جهد المجمع–الباعث)، لذلك فإن لجهد الخرج V_{CE} تأثير على تيار الخرج I_C.

تتألف مميزة الخرج من ثلاثة مناطق: المنطقة الفعالة active region ومنطقة الإشباع saturation region ومنطقة القطع cut-off region.

بالنسبة للمنطقة الفعالة التي تكون فيها وصلة القاعدة الباعث (وصلة الدخل) منحازة أمامياً، ووصلة المجمع – الباعث (وصلة الخرج) منحازة عكسياً، تشكل هذه المنطقة الجزء الخطي linear (معادلة مستقيم) من المميزة من أجل قيمة ثابتة لتيار القاعدة I_B والتي يعمل فيها الترانزستور كمضخم الكتروني للإشارة الكهربائية المتناوبة.

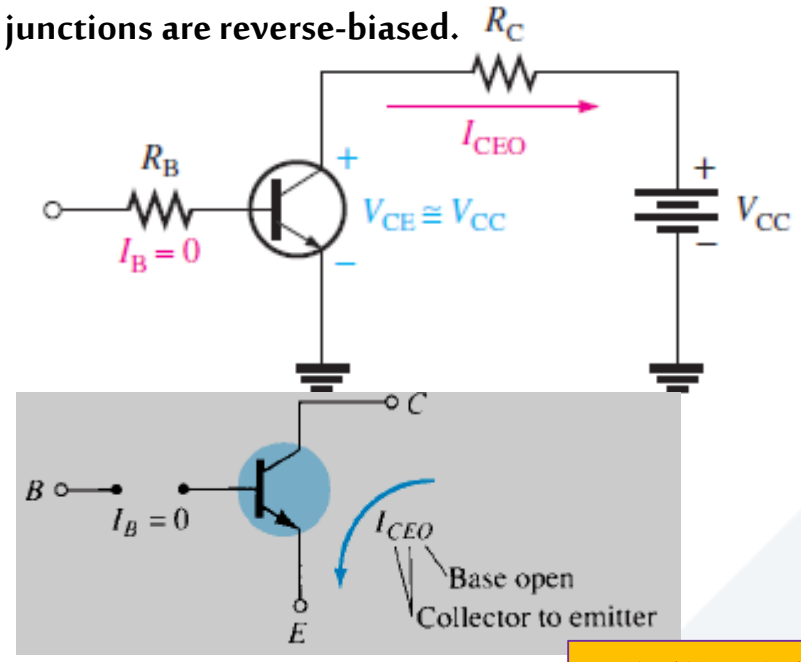
أما منطقة الإشباع فتكون كل من وصلة القاعدة – الباعث، ووصلة المجمع – الباعث منحازة أمامياً.

أما منطقة القطع فتكون كل من وصلة القاعدة – الباعث، ووصلة المجمع – الباعث منحازة عكسياً.

يعمل الترانزستور كمفتاح الكتروني switch في منطقة الإشباع الحالة ON، ومنطقة القطع الحالة OFF. ويستخدم في هذه الحالة لتحقيق البوابات المنطقية.

Cutoff

Cutoff: Collector leakage current (I_{CEO}) is extremely small and is usually neglected. Base-emitter and base-collector junctions are reverse-biased.



يمكن كتابة العلاقة العامة لحساب التيار I_{CEO}:

$$I_{CEO} = \left.\frac{I_{CBO}}{1-\alpha}\right|_{I_B=0\,\mu A}$$

كما يظهر من مميزة الخرج، من أجل قيمة صفرية لتيار القاعدة $I_B = 0$، فإن تيار الخرج (تيار المجمع) لا يساوي الصفر.

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

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

$$I_C = \frac{\alpha I_B}{1-\alpha} + \frac{I_{CBO}}{1-\alpha}$$

$$I_C = \frac{\alpha(0\text{ A})}{1-\alpha} + \frac{I_{CBO}}{1-0.996}$$

$$= \frac{I_{CBO}}{0.004} = 250 I_{CBO}$$

$\alpha = 0.996$

من أجل $I_{CBO} = 1\ \mu A$، فإن $I_C = 0.25\ mA$.

يشير الرمز CEO إلى مجمع –باعث مع قاعدة مفتوحة أي $I_B = 0$.

والرمز CBO إلى مجمع قاعدة مع باعث مفتوح أي $I_E = 0$

Beta (β)

من أجل التحليل المستمر dc للترانزستور، نعرف النسبة بين تيار المجمع _تيار الخرج) وتيار القاعدة (تيار الدخل) عند نقطة عمل الترانزستور بالعلاقة الآتية: (تُسمى β بربح التيار الأمامي)

تتراوح قيمة بين 50 و 400.

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

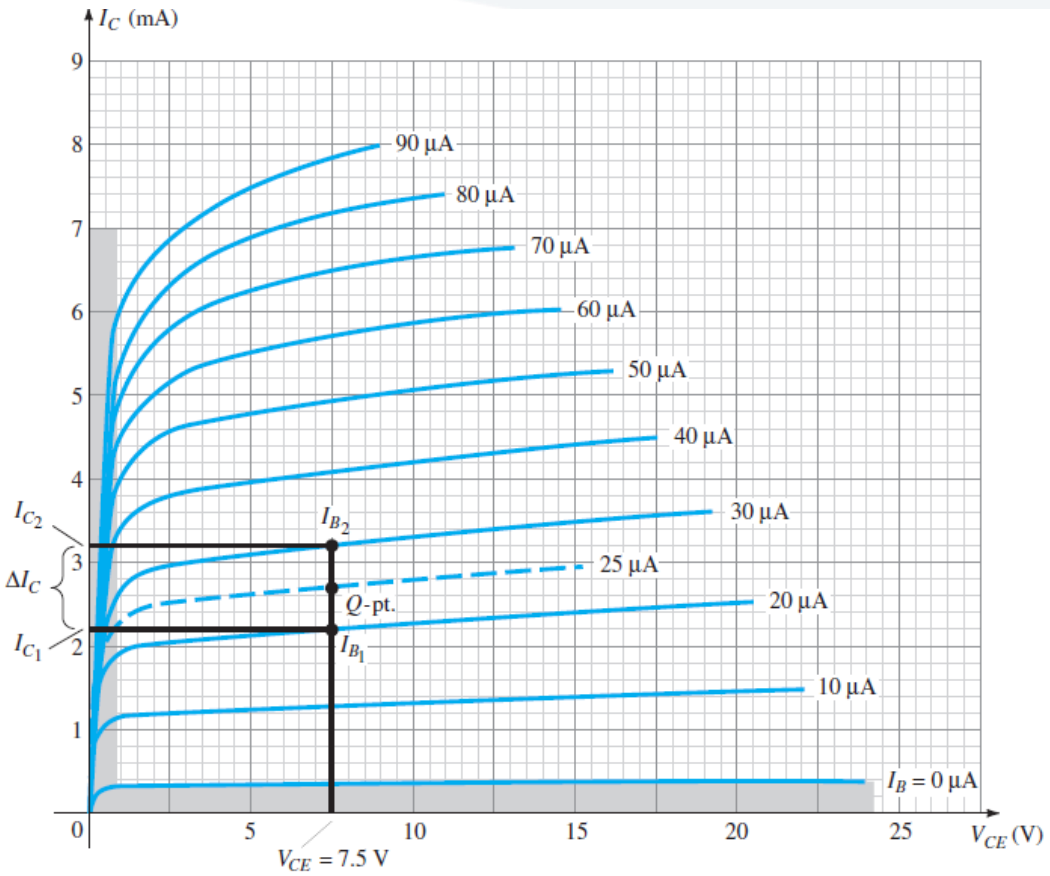
أما بالنسبة للتحليل المتناوب ac، فإن النسبة تُعطى بالعلاقة الآتية:

$$\beta_{ac} = \left.\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\right|_{V_{CE}=\text{constant}}$$

common-emitter , forward-current , amplification factor

تُعطى β في datasheet للترانزستور من أجل التحليل المتناوب ac بالرمز $\beta_{ac} = h_{fe}$ ومن أجل التحليل المستمر dc بالرمز $\beta_{dc} = h_{FE}$.

Beta (β)



حساب من أجل التحليل المتناوب من أجل التغير حول نقطة العمل Q

$$\beta_{ac} = \left.\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\right|_{V_{CE}=\text{constant}} = \frac{I_{C_2} - I_{C_1}}{I_{B_2} - I_{B_1}}$$

$$= \frac{3.2\text{ mA} - 2.2\text{ mA}}{30\ \mu\text{A} - 20\ \mu\text{A}} = \frac{1\text{ mA}}{10\ \mu\text{A}}$$

$$= \mathbf{100}$$

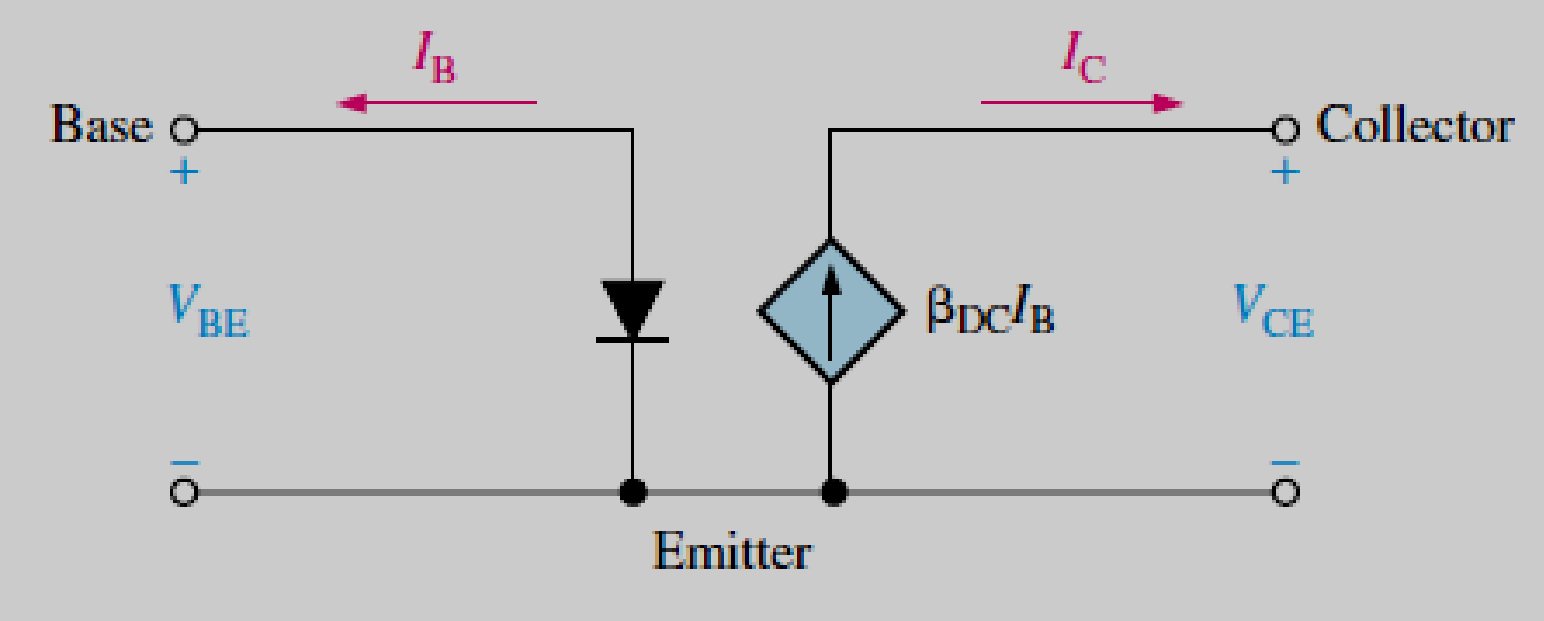
حساب من أجل التحليل المستمر عند نقطة العمل Q

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{2.7\text{ mA}}{25\ \mu\text{A}} = \mathbf{108}$$

$I_{CQ} = 2.7$ mA
$I_{BQ} = 25$ µA

Transistor DC Model

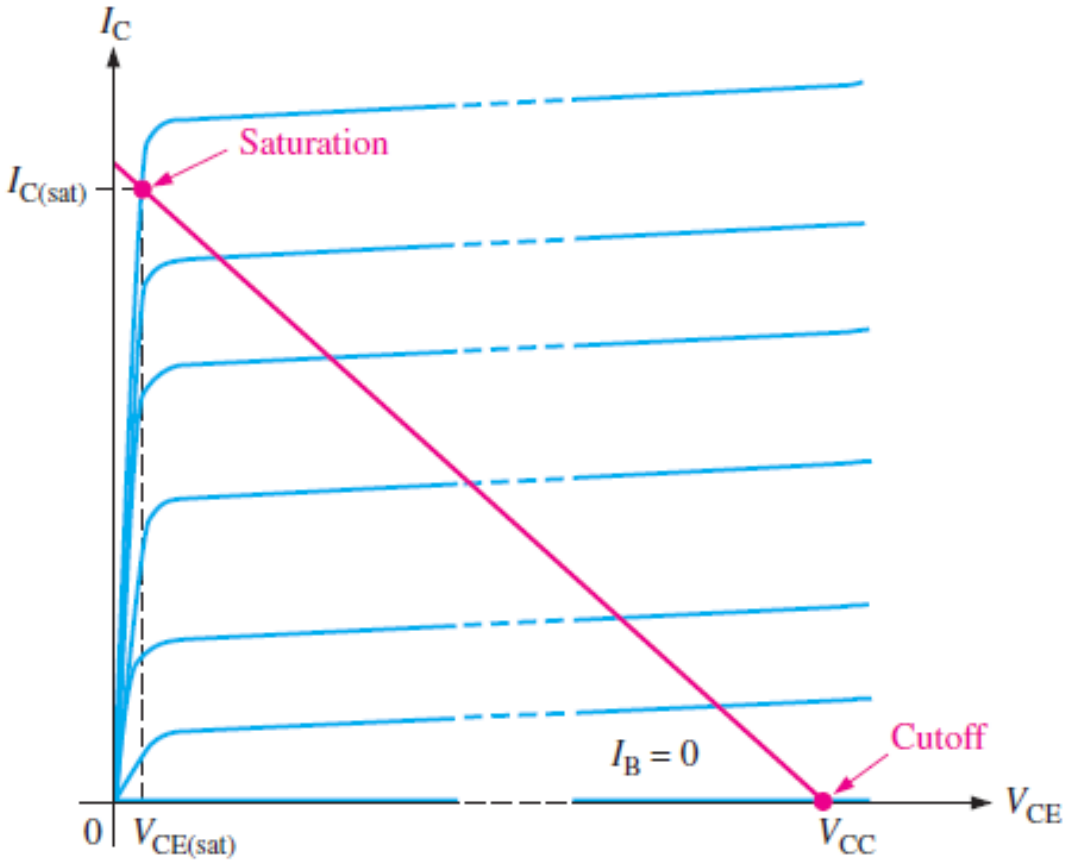
Ideal dc model of an npn transistor



الدارة المكافئة أو نموذج الترانزستور من أجل التحليل المستمر DC.

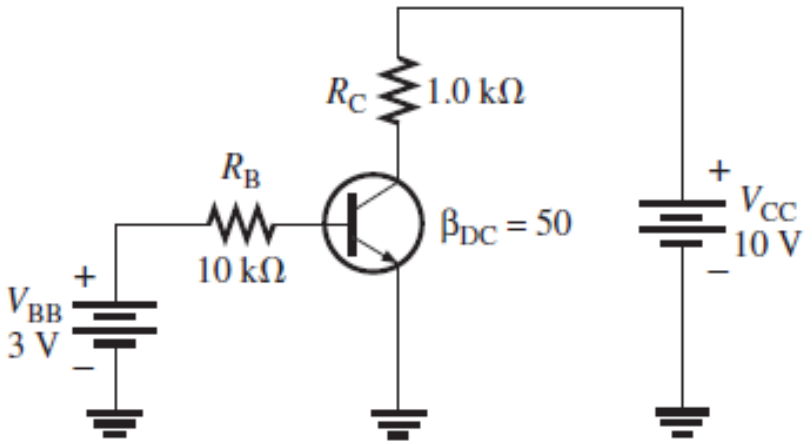
دارة الدخل عبارة عن متصل ثنائي منحاز أمامياً، ودارة الخرج عبارة عن منبع تيار متحكم به بالتيار (منبع غير مستقل)

DC Load Line



يُرسم خط الحمل الساكن بين نقطة منطقة القطع $V_{CE} = V_{CC}$ وبين نقطة منطقة الإشباع $I_C = I_{C(sat)}$.
ونقطة تقاطع خط الحمل مع قيمة I_B تُسمى بنقطة العمل الساكنة.

مثال



حدد فيما إذا كان الترانزستور يعمل في منطقة الإشباع أم لا؟

$V_{CE(sat)} = 0.2$ V.

كما هو واضح فإن قيمة التيار IC أكبر من قيمة تيار الإشباع IC(sat)، لذلك فإن الترانزستور يعمل في منطقة الإشباع.

First, determine $I_{C(sat)}$.

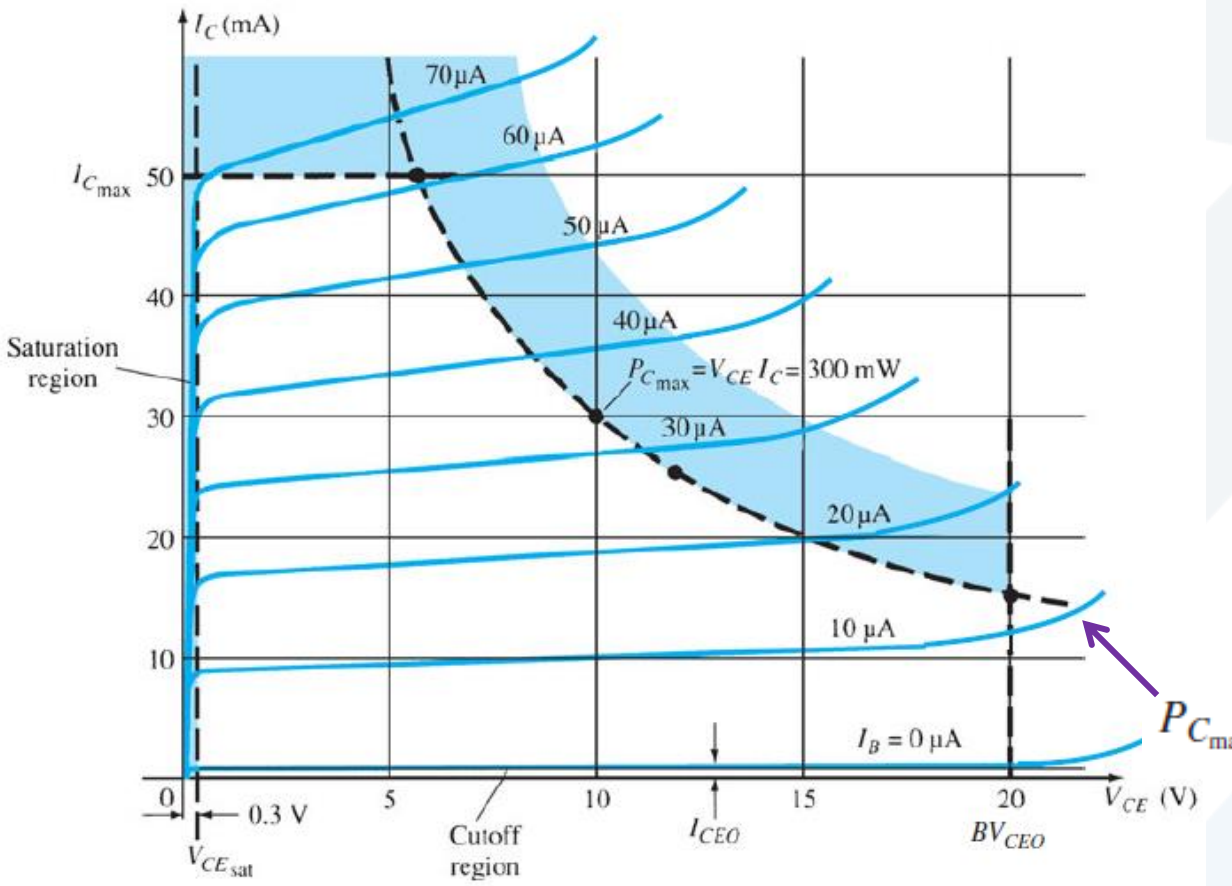
$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C} = \frac{10\text{ V} - 0.2\text{ V}}{1.0\text{ k}\Omega} = \frac{9.8\text{ V}}{1.0\text{ k}\Omega} = 9.8\text{ mA}$$

Now, see if I_B is large enough to produce $I_{C(sat)}$.

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{3\text{ V} - 0.7\text{ V}}{10\text{ k}\Omega} = \frac{2.3\text{ V}}{10\text{ k}\Omega} = 0.23\text{ mA}$$

$$I_C = \beta_{DC} I_B = (50)(0.23\text{ mA}) = 11.5\text{ mA}$$

Limits Of Operation



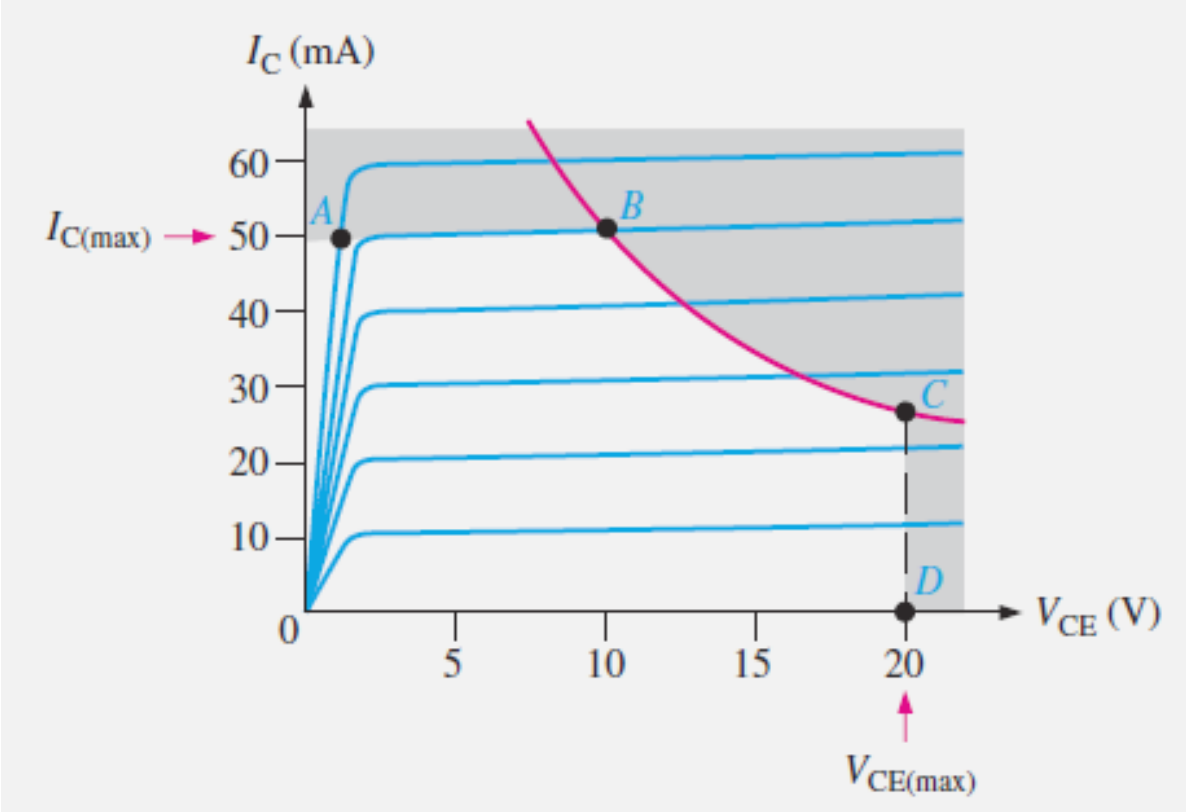
تعطى الاستطاعة العظمى المستهلكة للترانزستور ثنائي القطبية بالعلاقة الآتية:

$$P_{C_{max}} = V_{CE} I_C$$

يمكن رسم هذه العلاقة كما هو مبين بالخط المنقط على الشكل. الاستطاعة ثابتة على كامل هذا الخط، في مثالنا 300mW

$$P_{C_{max}} = V_{CE} I_C = 300 \text{ mW}$$

Limits Of Operation

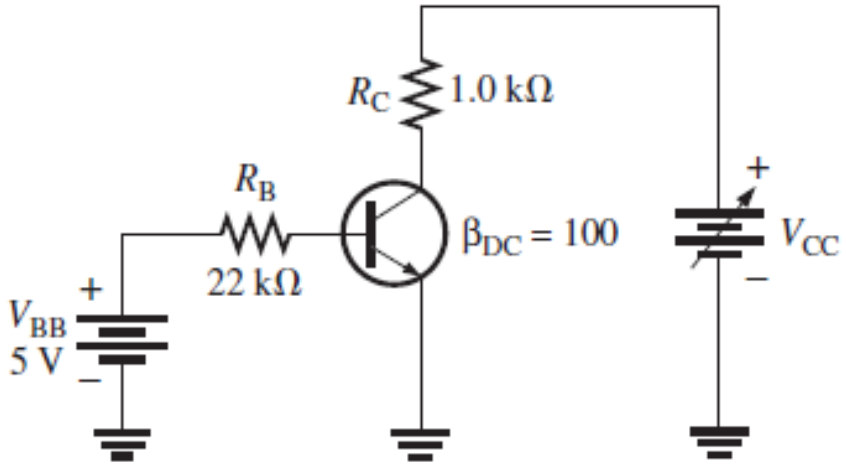


المنطقة المظللة تعني أن الترانزستور يعمل باستطاعة أكبر من الاستطاعة المسموحة، لذلك تحدد منطقة عمل الترانزستور بمنحني الاستطاعة والنقطة C التي توافق جهد خرج أعظمي، والنقطة B التي توافق تيار خرج أعظمي (المنطقة غير المظللة).

$P_{D(max)}$	V_{CE}	I_C
500 mW	5 V	100 mA
500 mW	10 V	50 mA
500 mW	15 V	33 mA
500 mW	20 V	25 mA

مثال

من أجل استطاعة عظمى $P_{D(max)} = 800\ mW$، وتيار خرج أعظمي $I_{C(max)} = 100\ mA$، وجهد خرج أعظمي $V_{CE(max)} = 15\ V$، جد قيمة المنبع V_{CC} بحيث لا تتجاوز استطاعة الترانزستور الاستطاعة الأعظمية المسموحة.



First, find I_B so that you can determine I_C.

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{5\ V - 0.7\ V}{22\ k\Omega} = 195\ \mu A$$

$$I_C = \beta_{DC} I_B = (100)(195\ \mu A) = 19.5\ mA$$

I_C is much less than $I_{C(max)}$ and ideally will not change with V_{CC}. It is determined only by I_B and β_{DC}.

DC Biasing—BJTs

- يتطلب تحليل دارات مضخمات الترانزستور معرفة بالاستجابة المستمرة dc والاستجابة المتناوبة ac لدارة المضخم.
- تملك كل دارة مضخم ترانزستوري جزء مستمر (ناتج عن المنابع المستمرة في الدارة) وجزء متناوب (ناتج عن المنابع المتناوبة). يمكن تطبيق نظرية التنضيد superposition، أي يمكن فصل الدارسة المستمرة للدارة عن الدراسة المتناوبة.
- يجب العلم أثناء تصميم دارة المضخم الترانزستوري أن قيم بارامترات الدارة المستمرة تؤثر على الاستجابة المتناوبة، والعكس صحيح.
- يتم التحكم بمستوى الاشارة المستمرة في الدارة من خلال عدة عوامل، أهمها موقع نقطة عمل الترانزستور ضمن مميزة خرج الترانزستور.
- يتم اختيار موضع نقطة العمل للترانزستور من خلال مستوى التيار والجهد المستمرين، بعدها يمكن تطبيق الإشارة المتناوبة المراد تضخميها.
- العناصر التي تدخل في اختيار نقطة العمل، تُسمى بدارة تحييز الترانزستور (انحياز Baising).
- يوجد العديد من الطرائق التي تستخدم لتحييز الترانزستور (اختيار موضع نقطة العمل ضمن مميزة خرج الترانزستور) من خلال اختيار مستور للتيار والجهد المستمرين..

المنطقة الفعالة

- في دارة المضخم الترانزستوري، اختيار موضع نقطة العمل من خلال تيار وجهد مميزة الترانزستور، يحدد مجال التضخيم الممكن للإشارة الدخل.
- كون نقطة العمل تصبح ساكنة لا يمكن تغييرها، لذلك تُدعى نقطة العمل الساكنة quiescent point أو اختصاراً q-point.
- يبين الشكل خصائص مميزة الترانزستور مع أربعة نقاط عمل A, B, C, D.
- تُصمم دارة الانحياز لجعل جهاز الترانزستور يعمل عند أي نقطة عمل من هذه النقاط. تُسمى المنطقة التي تقع فيها نقاط العمل بالمنطقة الفعالة active region.
- تقع حدود المنطقة الفعالة أو المنطقة الخطية بين الخط الأفقي لقيمة تيار المجمع (تيار الخرج) الأعظمية $I_{C(max)}$، والخط العامودي لقيمة الجهد الأعظمي $V_{CE(max)}$ (جهد مجمع –باعث وهو جهد الخرج للترانزستور)، ومنحني الاستطاعة $P_{C(max)}$، ومنطقة القطع cut-off (التي يكون فيها $I_B \leq 0$) ومنطقة الاشباع (التي يكون فيها $V_{CE} \leq V_{CE(sat)}$.