أسس الالكترونيات
Basic-Electronics

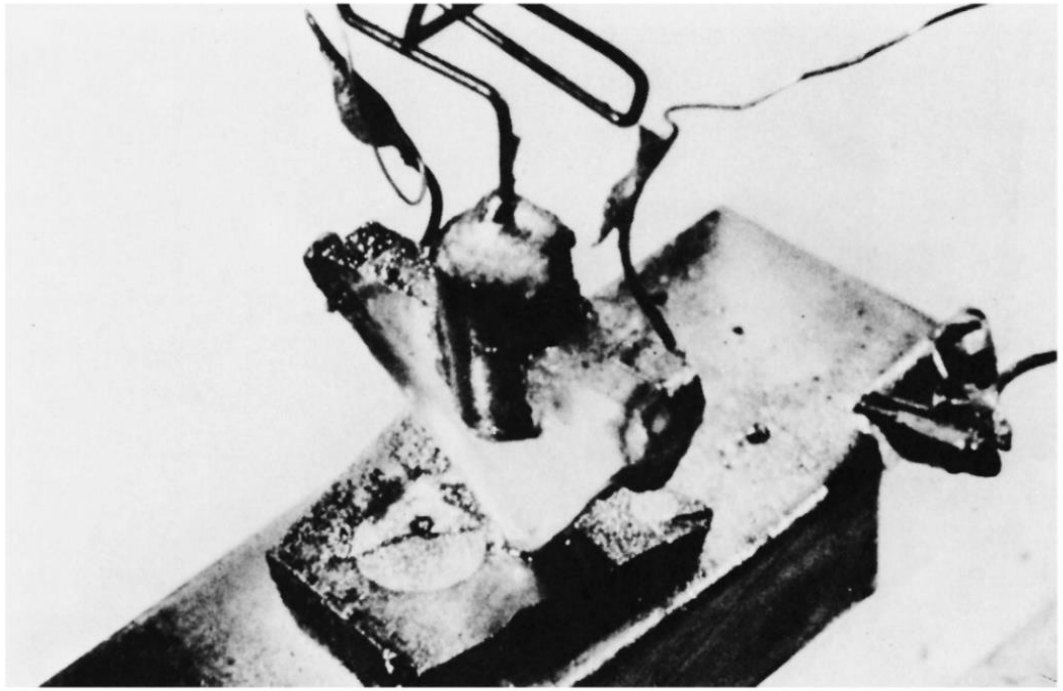
الترانزستور ثنائي القطبية
Bipolar Junction Transistors (BJT)

مدرس المقرر
د. السموءل صالح

مقدمة

-- الترانزيستور(TRANSISTOR): مشتق كمصطلح من الكلمتين التاليتين، تحويل (TRANsfer) و مقاومة (reSISTOR) ويقصد به العنصر المحول للمقاومة.

-- الترانزيستور(BJT) ثنائي القطبية : لان الحوامل الأكثرية والأقلية، نوعان من حوامل الشحن (الالكترونات والثقوب) تشارك في توليد تيارات الترانزستور.



الترانزيستور الأول (مخابر شركة بل للهاتف) The first transistor

بنية الترانزيستور Transistor Construction

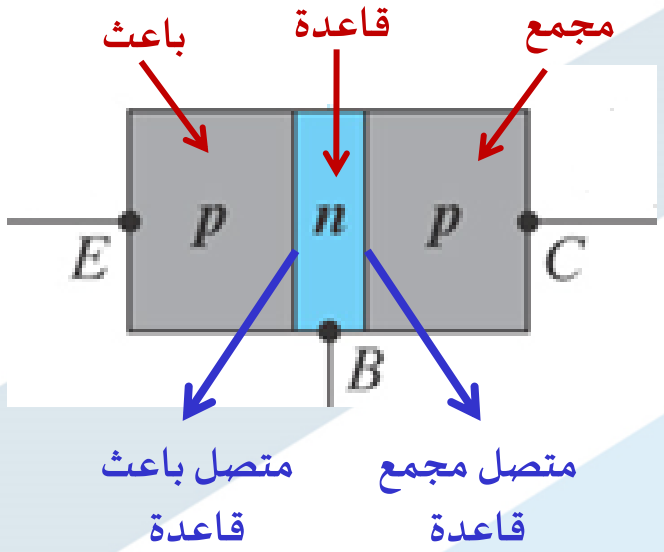
-- يتكون الترانزستور من ثلاث مناطق مصنعة من مادة نصف ناقلة

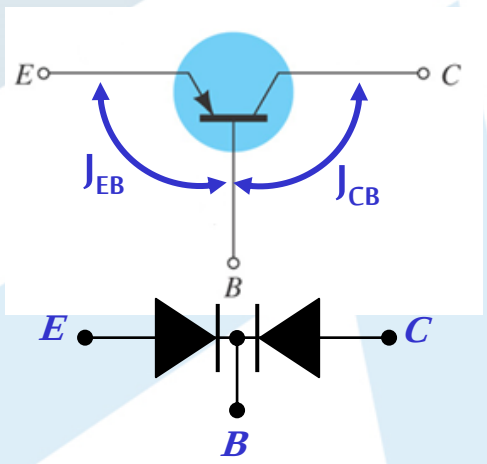
أ- الوسطى منها تكون الأقل سماكة وتمثل المادة المختلفة وتسمى القاعدة Base (B).

ب- المنطقتان المحيطتان تتكونان من نفس المادة ولكن بدرجتي إشابة مختلفتين وهما :

١- الباعث Emitter (E) : المنطقة اليسرى للقاعدة وهي ذات إشابة عالية

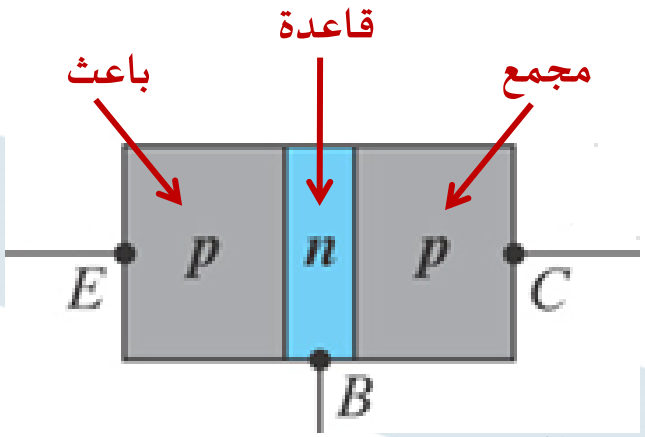
٢- المجمع Collector (C) : المنطقة اليمنى للقاعدة وهي ذات إشابة قليلة.

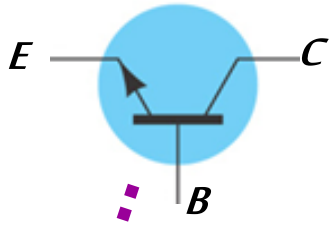




-- لدينا متصلان (ثنائيان) الأول باعث- قاعدة والثاني مجمع- قاعدة، بتغير انحياز هذين المتصلين نحصل على منطقة العمل المطلوبة.

بنية الترانزيستور Transistor Construction





-- أذا لدينا نوعان أساسيان لـ BJT وهما PNP & NPN

-- أنماط عمل الـ BJT:

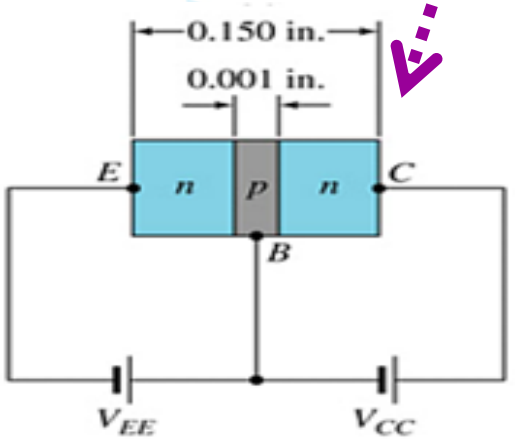
١- النمط الفعال، عكسي J_{CB}= off & J_{EB}= on، أمامي، حقن من E وتجميع في C ، نمط التضخيم.

٢- نمط الإشباع، J_{CB}= on & J_{EB}= on، أماميان، حقن من C&E وتجميع في B.

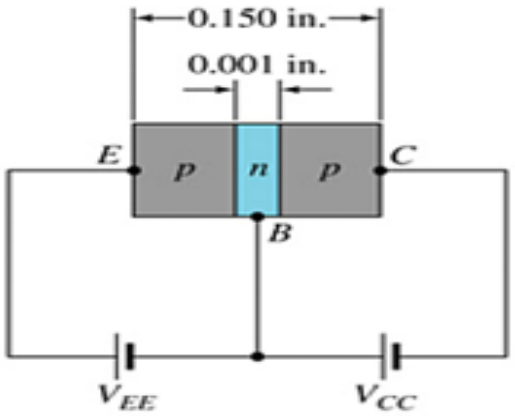
٣- نمط القطع، J_{CB}= off & J_{EB}= off، عكسيان، تيار المجمع يصبح معدوما تقريبا أو يساوي تيار الإشباع العكسي .

٤- النمط الفعال العكسي، J_{CB}= on & J_{EB}= off، حقن من C وتجميع في E، عكس ١ ، تختلف البارامترات.

npn



pnp

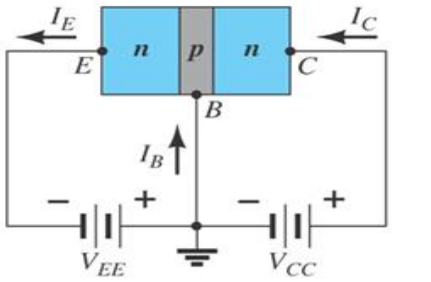


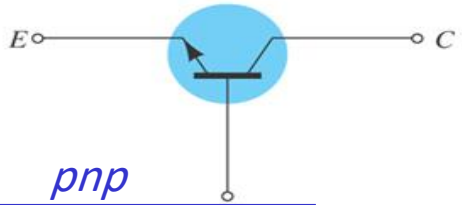
Circuit types of Transistor

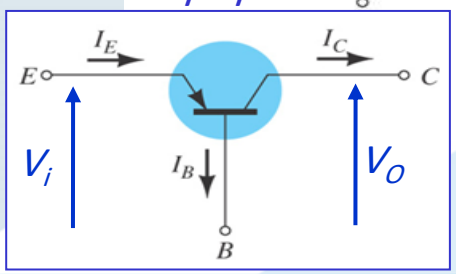
تشكيلات الترانزستور

1- Common Base

دارة القاعدة المشتركة (تكون مؤرضة و مشتركة بين دارة الدخل عبر الباعث و الخرج عبر المجمع)

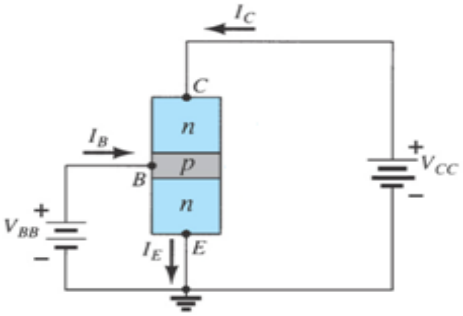


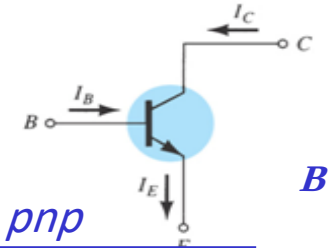


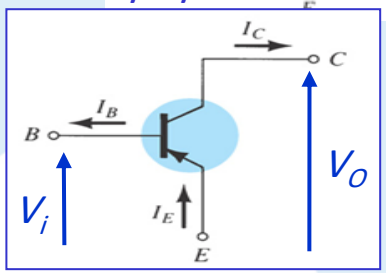


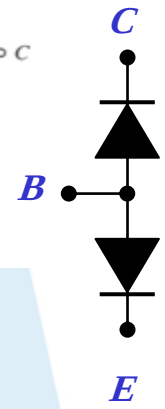
2- Common Emitter

دارة الباعث المشترك



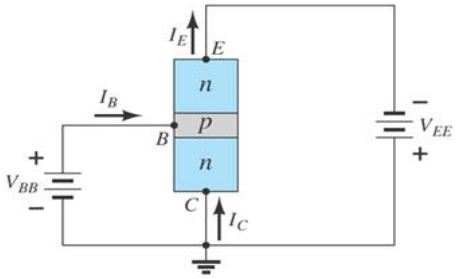


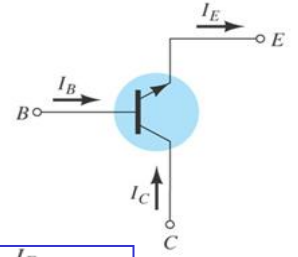


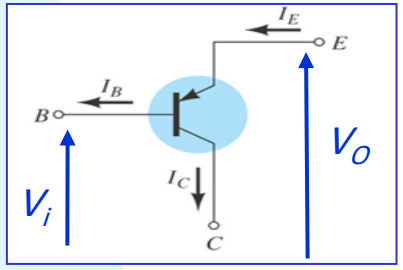


3- Common Collector

دارة المجمع المشترك (يكون مؤرضا و مشتركا بين دارة الدخل عبر القاعدة و الخرج عبر الباعث)







Transistor Operations

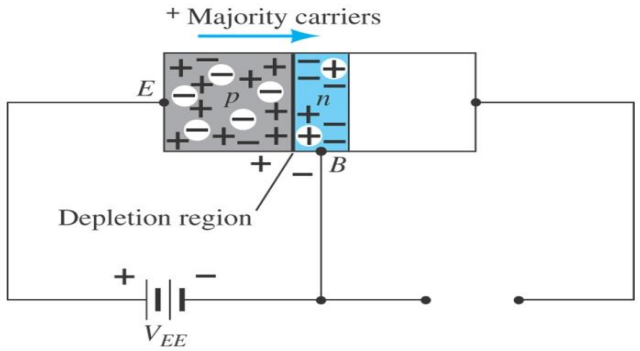
مبدأ عمل الترانزيستور

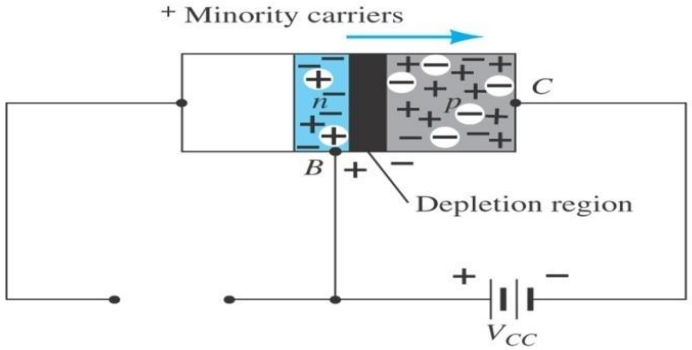
آلية العمل الفيزيائية:

-- يفهم مبدأ عمل الترانزستورفي النظام الفعال وفي وصلة القاعدة المشتركة عن طريق تحيزكل من المتصلين J_e= on & J_c= off ثم دراسة حركة حوامل الشحن الأكثرية والأقلية لكل من النوعين pnp & npn ثم ايجاد علاقة تربط بين التيارات الناتجة عن هذه الحوامل.

-- نتيجة الإشابة العالية للباعث تكون مقاومته النوعية اصغر من المقاومة النوعية للقاعدة ذات الإشابة المنخفضة.

-- الإشابة المنخفضة للمجمع تقلل من الناقلية ، إذا تزيد من المقاومة.





-- المتصل pn ،قاعدة باعث، بحالة J_e= on أمامي نتيجة التحيز الأمامي للجهد V_{EE} وبالتالي الحوامل الأكثرية (الثقوب) تحقن إلى القاعدة.

-- القاعدة ذات العرض القليل ستحوي الكثير من الحوامل الأكثرية

-- المتصل np ،قاعدة مجمع، بحالة J_c= off عكسي نتيجة التحيز العكسي للجهد V_{CC} و بالتالي الحوامل الأكثرية (الالكترونات) في القاعدة والثقوب الحوامل الأقلية ونتيجة الجهد العكسي سينشأ تيار تسريب عكسي ذو قيمة صغيرة.

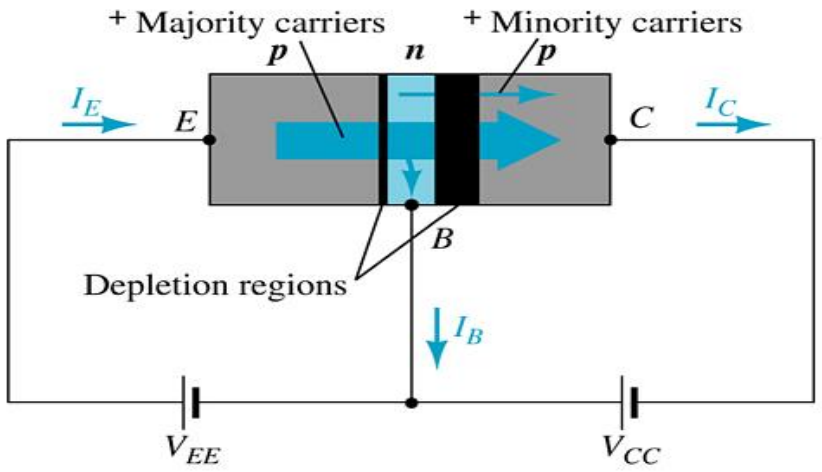
-- هذا التيار سيشارك بالتيار الكلي للترانزستور

آلية العمل الفيزيائية وتحديد تيارات الأقطاب الثلاثة في وصلة القاعدة المشتركة للنوع pnp:

-- الترانزستور يعمل في النظام الفعال أي J_e = on & J_c = off بعد عملية التحيز تحدث الآليات التالية:

١- تدفق كبير لحوامل الشحن الأكثرية (الثقوب) أي تتم عملية حقن للثقوب من الباعث باتجاه القاعدة ويتكون تيار الباعث، تيار الحوامل الأكثرية يعطى بـ: $I_{PE}=\gamma I_E$ حيث : γ معامل الحقن و I_E عبارة عن تيار الباعث الناتج عن جذب الحوامل الأقلية (الالكترونات) من قبل موجب منبع التغذية.

٢- تدفق للالكترونات من القاعدة باتجاه الباعث، يوجد مركبة الكترونية تشارك في تيار الباعث أي $I_E=I_{PE}+I_{EN}$ ولكن ونتيجة فرق كثافة الحوامل بين الباعث والقاعدة يمكن إهمال المركبة التسربية للالكترونات الواردة من القاعدة لان $I_{EN}=(1-\gamma)I_E$ وهذا التيار صغير جدا ومهمل أمام تيار الباعث لان $\gamma \approx 1$ كون المقاومة النوعية للقاعدة اكبر من تلك للباعث.



- الثقوب المحقونة من الباعث وكون الثقوب حوامل أقلية في القاعدة سيتحد جزء منها مع الحوامل الأكثرية (الكترونات القاعدة) وتكون جزء من تيار القاعدة ستناقش هذه الحالة لاحقا مع تيار المجمع.

آلية العمل الفيزيائية وتحديد تيارات الأقطاب الثلاثة في وصلة القاعدة المشتركة للنوع *pnp*:

٣- الجزء الأكبر من الثقوب الواردة من الباعث ونتيجة فرق الكثافة في منطقة القاعدة ستنتشر باتجاه المتصل J_c وعندما تصل لأطراف هذا المتصل يقوم الحاجز الكموني العكسي للمتصل بجرفها إلى المجمع مكونة تيار المجمع: $I_{PC}=\gamma x I_E$ حيث $x=I_{PC}/I_{PE}$ يعبر عن معامل النقل أو التحويل وهو اصغر من الواحد ويحدد كمية الحوامل الأكثرية الواصلة إلى المجمع .

- جزء صغير منها يتحد مع الكترونات القاعدة مساهما بمرور تيار القاعدة، يعطى بـ: $I_{pB}=(1-x)\gamma I_E$ يختل قانون التعادل في القاعدة مما يتطلب سحب الكترونات لتعويض النقص من سالب المنبع وهذا يشكل تيار القاعدة الخارجي I_B.

٤- الثقوب المنجرفة إلى المجمع تجعله ذو شحنة موجبة عالية جدا (يتزايد عدد الثقوب كما لو إننا ضربنا بمعامل تضخيم M) يختل التوازن (التعادل) مما يتطلب دخول الكترونات من سالب منبع التغذية للتعويض منتجة تيار المجمع: $I_C=M.I_{pC}=\gamma xMI_E$

٥- لا ننسى تيار التسريب العكسي الناتج عن التحيز العكسي للمتصل و الذي يشارك بقيمة تيار المجمع بالعلاقة التالية:

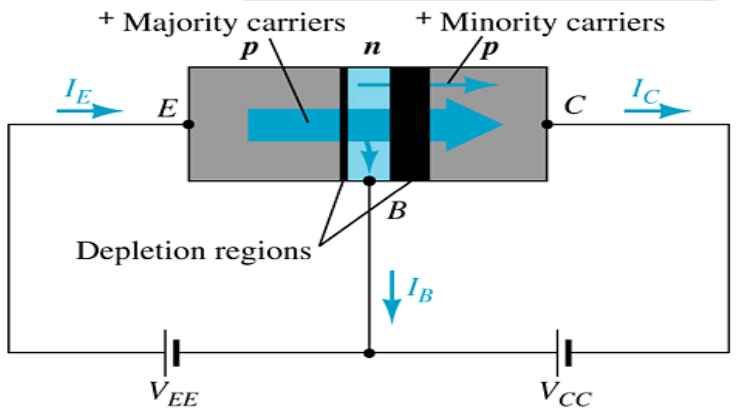
$$I_C=\gamma xMI_E+I_{CB0} \Rightarrow I_C=\alpha I_E+I_{CB0}$$

حيث $\alpha=\gamma xM$ يمثل معامل ربح التيار، يمكن إهمال تيار الإشباع العكسي إمام تيار المجمع إذا يمكن أن نكتب:

$$I_C=F(I_E) \Rightarrow I_C\approx\alpha I_E \Rightarrow \alpha_{DC}\approx I_C/I_E=[0.95, 0.99] \text{ and } \alpha_{AC}\approx\Delta I_C/\Delta I_E.$$

آلية العمل الفيزيائية وتحديد تيارات الأقطاب الثلاثة في وصلة القاعدة المشتركة للنوع pnp:

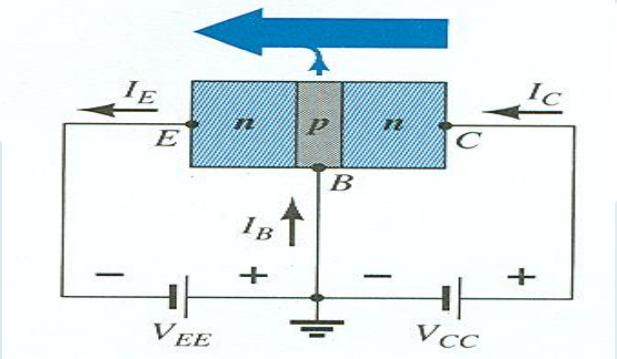
٦- من الدارة الخارجية وعند عقدة التيار يمكن كتابة العلاقة بين تيارات الترانزستور وهي: $I_E = I_C + I_B$ إذا تيار الباعث يتكون من مجموع تيارين:



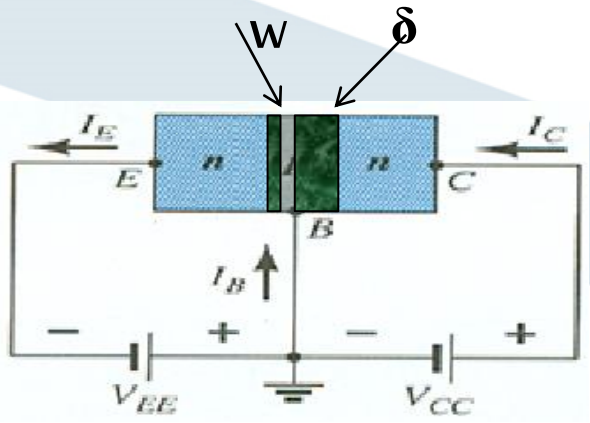
أ- تيار المجمع المتعلق بحركة الحوامل الأكثرية المحقونة من الباعث في حالتنا هي الثقوب:

$$I_C = I_{Cmajority} + I_{Cminority} \approx \alpha I_E$$

ب- تيار القاعدة الناتج عن اتحاد بعض الحوامل الأكثرية القادمة إلى القاعدة مع الحوامل ا
لأكثرية في القاعدة ويمكن أن يعطى بـ: $I_B \approx (1-\alpha) I_E$



ملاحظة: بالنسبة لمناقشة الترانزستور نوع npn تكون بنفس الطريقة السابقة مع مراعاة أن الحوامل الأكثرية هي الالكترونات ومراعاة عكس منابع التغذية حتى نحصل على نظام العمل الفعال وبالتالي ستعكس جهة التيارات الخارجية.

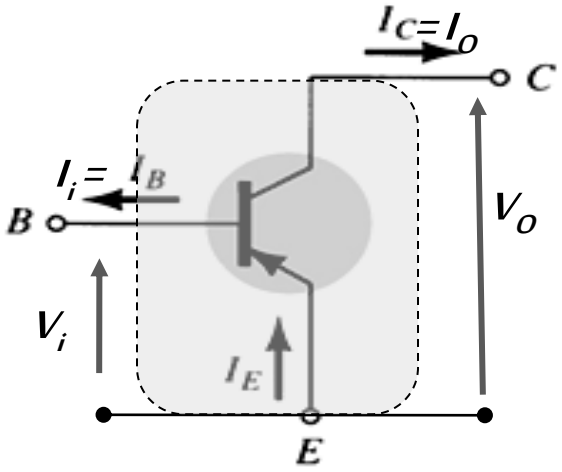


تعديل عرض القاعدة أثر ايرلي Base Width Modulation

لنأخذ وصلة القاعدة المشتركة: هذه الوصلة تعمل في المنطقة الفعالة أي أن: المتصل J_{EB} محيز أماميا و المتصل J_{BC} عكسي.

إذا تغيرات تيار الخرج و بالتالي تغيرات في عمل الترانزيستور	زيادة $R_B \uparrow\uparrow$ مقاومة القاعدة	انخفاض $w \downarrow\downarrow$ => العرض الفعال للقاعدة	يزداد $\delta \uparrow\uparrow$ عرض المنطقة المجردة	$V_{CB} \uparrow\uparrow => J_{BC}$ $\uparrow\uparrow$ => (يزداد عكسيا)
$I_B \downarrow\downarrow => \uparrow\uparrow I_C = I_E - I_B$ =>				

المميزات الساكنة للترانزستور BJT BJT Static Characteristics



-- يكافأ الترانزيستور مهما كانت وصلته برباعي أقطاب و تكون مميزاته أو خواص الدخل، خرج والنقل كما يلي:

١- مميزة الدخل: $I_{in} = f(V_{in})\big|_{V_{out}=const}$

٢- مميزة الخرج: $I_{out} = f(V_{out})\big|_{I_{in}=const}$

٣- مميزة النقل الأمامي للتيار: $I_{out} = f(I_{in})\big|_{V_{out}=const}$

٤- مميزة التغذية الخلفية بالجهد: $V_{in} = f(V_{out})\big|_{I_{in}=const}$

Common-Base Static Characteristics NPN

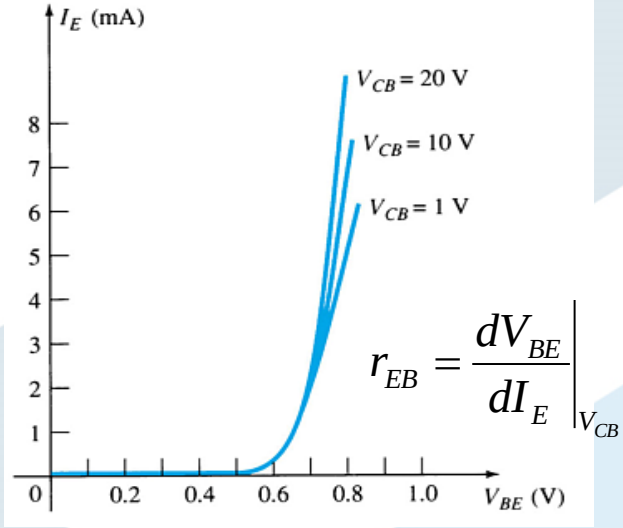
المميزات الساكنة لوصلة القاعدة المشتركة

Input Characteristics مميزة الدخل

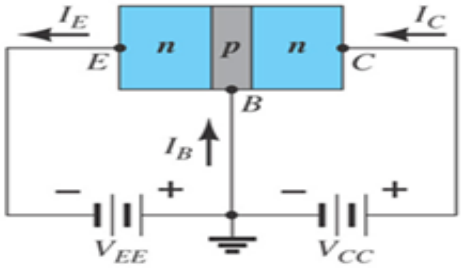
$$I_E = f(V_{BE})\big|_{V_{CB}=const}$$

تشبه مميزة الفولت-أمبير للديود، الانحياز الأمامي وهي تبين العلاقة بين تيار الدخل (I_E) و جهده (V_{BE}) مع ثبات جهد الخرج العكسي (V_{CB}) الذي يزيح المميزة لليسار.

مقاومة الدخل الدينامكية تعطى بـ:



$$r_{EB} = \frac{dV_{BE}}{dI_E}\bigg|_{V_{CB}=ct} \approx (10 \rightarrow 100)\Omega$$



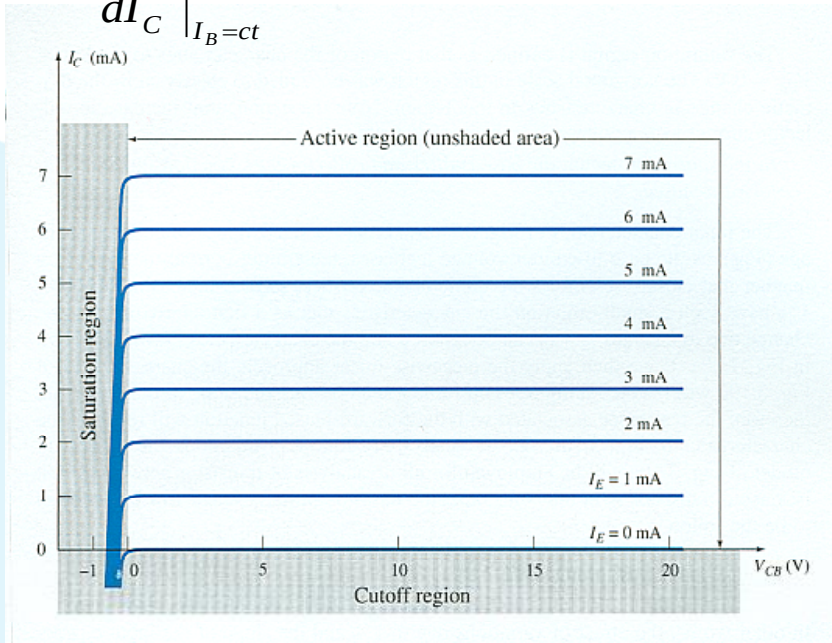
Output Characteristics مميزة الخرج

$$I_C = f(V_{CB})\big|_{I_E=const}$$

هذه المميزة تربط تيار الخرج (I_C) مع جهده (V_{CB}) من اجل عدة قيم لتيار الدخل(I_E).

مقاومة الخرج الدينامكية تعطى بـ:

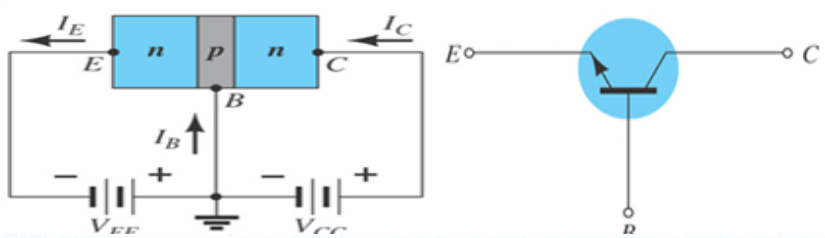
$$r_{CB} = \frac{dV_{CB}}{dI_C}\bigg|_{I_B=ct}$$

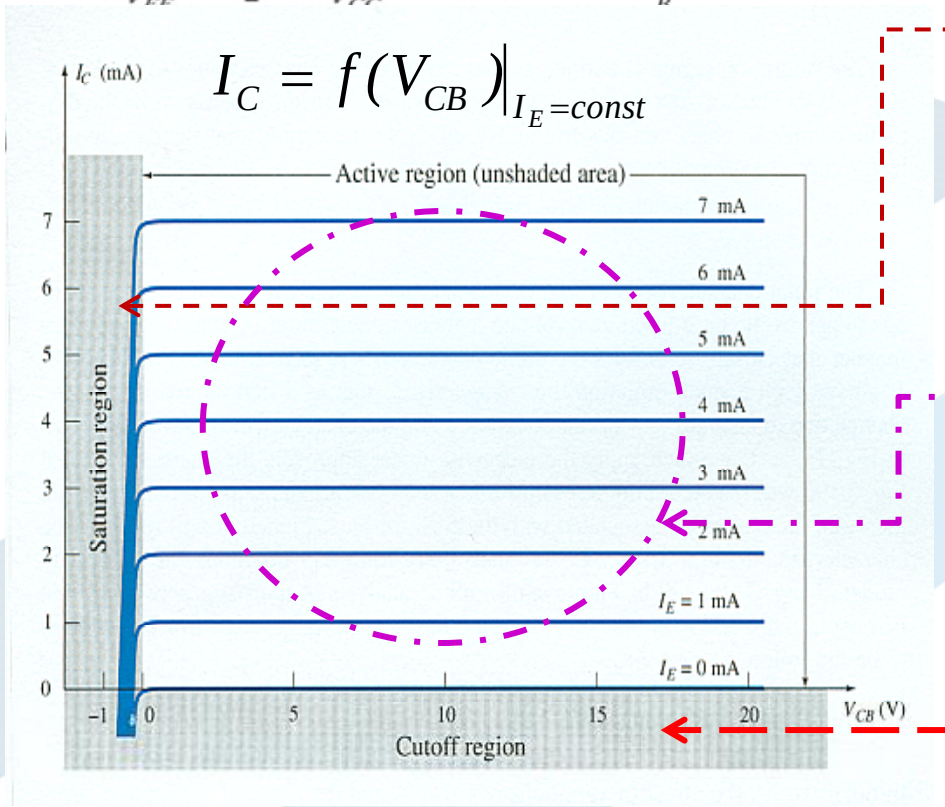


ملاحظة: للحصول على مميزة خرج الترانزستور نوع PNP نقوم بعكس قطبية V_{CB} نأخذه بقيم سالبة

Active region Limits in NPN

حدود المنطقة الفعالة لمميزة الخرج





*- هذه المميزة تبدأ قبل محور التيار أي عندما يكون الجهد V_{CB} سالب وعندما $V_{CB}=0$ (قصر الخرج) يمر تيار كبير في المجمع نتيجة حقن الحوامل من الباعث وتختلف قيمته حسب I_E هذه المنطقة تسمى بمنطقة الإشباع عند $V_{CB}<0$ في هذه المنطقة بزيادة سلبية الجهد ينخفض التيار بسرعة كبيرة لان وصلة المجمع تكون منحازة أماميا، تحقن الحوامل إلى القاعدة مخفضة بذلك تيار المجمع حتى نصل لجهد العتبة فينعدم تيار المجمع .

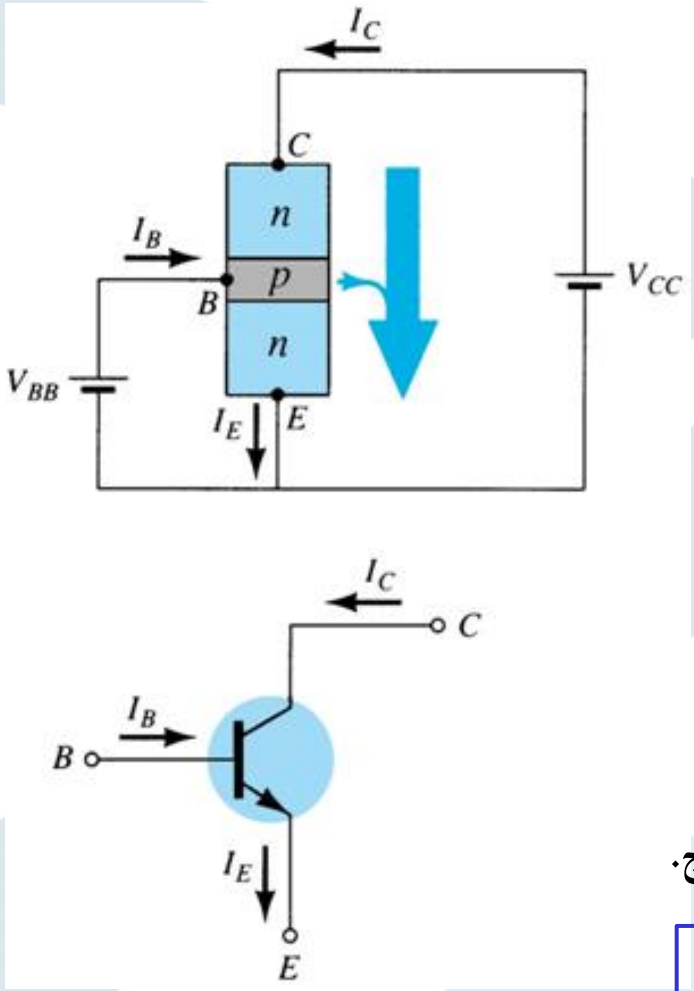
**- بزيادة الجهد العكسي يبقى تيار الخرج I_C ثابت ، تتغير قيمته بتغير I_E، تأثير V_{CB}مهمل على I_C و يكون عندها $I_C = I_E$ هذه المنطقة تسمى المنطقة الفعالة.

*** - بعد قيمة معينة للجهد يصل الترانزستور لمنطقة الانهيار ويسمى جهد الانهيار، ينقص بزيادة تيار الباعث.

****- عندما $I_E=0$ (فتح الدخل) في هذه الحالة يمر تيار الإشباع العكسي $I_C \approx I_{CBO}$ الصغير جدا بالمقارنة مع I_C لذلك لا يظهر على المميزة، والمنطقة التي تحته هي منطقة القطع.

Transistor Operations

مبدأ عمل الترانزيستور



آلية العمل الفيزيائية وتحديد تيارات الأقطاب الثلاثة في وصلة الباعث المشتركة:

أ- لآلية الفيزيائية المشروحة سابقا لا تتغير بتغير الوصلة وتبقى المعادلة السابقة نفسها ولكن بالنسبة لهذه الوصلة يجب علينا إيجاد العلاقة التالية: $I_C=F(I_B)$

لدينا: $I_E=I_C+I_B$ و $I_C=\alpha I_E+I_{CB0}$ => $I_C=\alpha(I_C+I_B)+I_{CB0}$

بالتالي قيمة تيار المجمع بدلالة تيار القاعدة تعطى بـ:

$$I_C=\frac{\alpha}{1-\alpha}I_B+\frac{1}{1-\alpha}I_{CB0}\Rightarrow$$

$$I_C=\beta I_B+(1+\beta)I_{CB0}=\beta I_B+I_{CE0}\Rightarrow$$

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

حيث أن: عندما $I_B=0$ يكون الترانزستور في حالة قطع ولكن يمر تيار التسريب العكسي في الوصلة $I_{CE0}=I_{CB0}/(1-\alpha)=(1+\beta)I_{CB0}$، قيمته صغيرة جدا وتهمل أمام I_C. $\beta=\alpha/(1-\alpha)$ تمثل معامل ربح الترانزستور في وصلة الباعث المشترك وتعطى بـ: ١- عند التيار المستمر $\beta_{DC}\approx I_C/I_B$

٢- عند التيار المتناوب $\beta_{AC}=\Delta I_C/\Delta I_B$ بثبات $V_{CE}=Ct$، تقدر قيمتها بـ: $\beta=(20\rightarrow 500)$ تتعلق قيمتها بحركية الحوامل الأكثرية عادة $\beta_{AC}=\beta_{DC}$ يمكن التأكد مباشرة والحساب عن طريق مميزة الخرج.

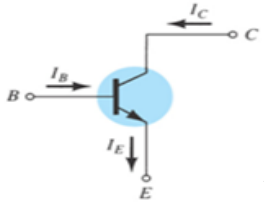
ملاحظة: جهة السهم في رسمه الترانزستور وبأي وصلة هي من P إلى N وتدل دائما على جهة تيار الباعث I_E.

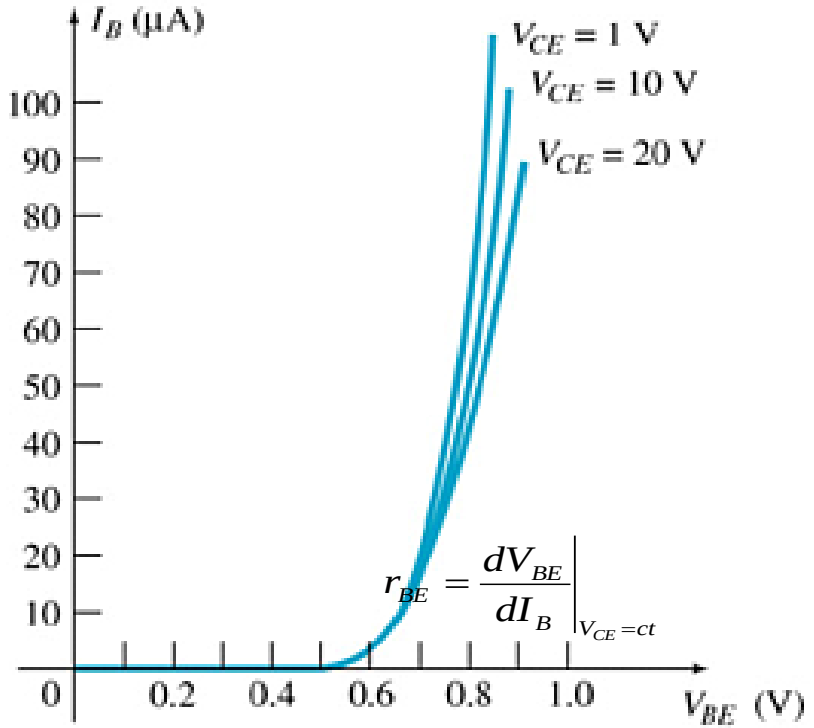
Common-Emitter Static Characteristics NPN

المميزات الساكنة لوصلة الباعث المشترك

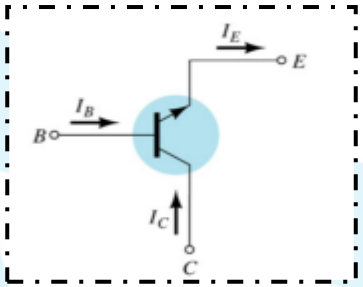
مميزة الدخل Input (Base) Characteristics

$$I_B = f(V_{BE})\big|_{V_{CE}=ct}$$





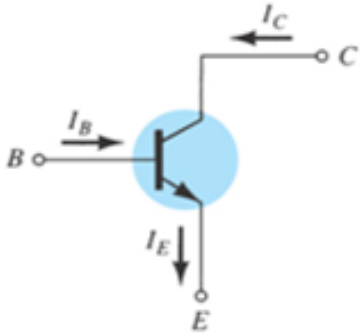
تشبه مميزة الفولت-أمبير للديود، الانحياز الأمامي و هي تبين العلاقة بين تيار الدخل (I_B) و جهده (V_{BE}) مع ثبات جهد الخرج العكسي (V_{CE}) الذي يزيح المميزة لليسار بانخفاضه و يخفض I_B، نتيجة تأثير عرض القاعدة حيث ان I_B يتناسب عكسا مع حجم المنطقة المجردة.



ملاحظة: المميزات الساكنة لوصلة المجمع المشترك هي نفسها للباعث المشترك ولكن نبدل في مميزة الخرج تيار المجمع بتيار الباعث.

Common-Emitter Static Characteristics NPN

المميزات الساكنة لوصلة الباعث المشترك



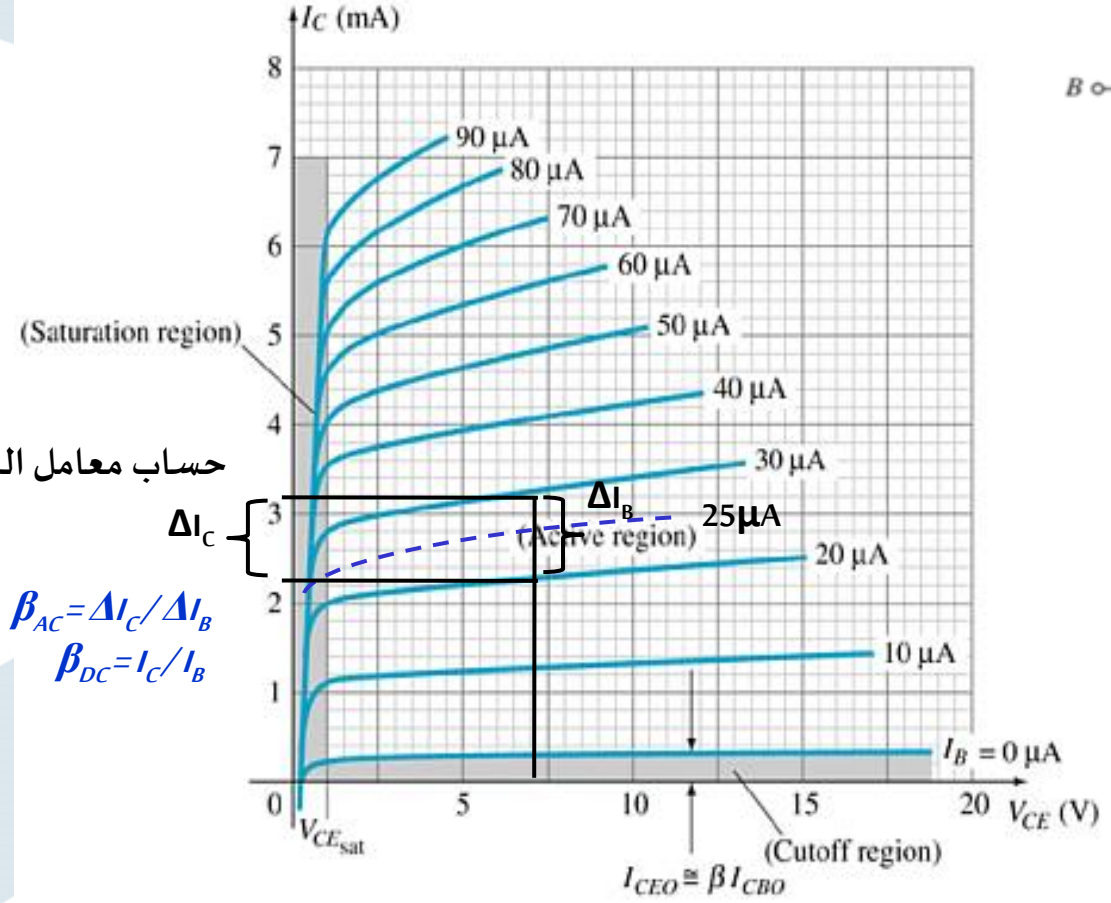
Output (Collector) Characteristics مميزة الخرج

$$I_C = f(V_{CE})\big|_{I_B=ct}$$

هذه المميزة تربط تيار الخرج (I_C) مع جهده (V_{CE}) من أجل عدة قيم لتيار الدخل(I_B).

مقاومة الخرج الدينامكية تعطى بـ:

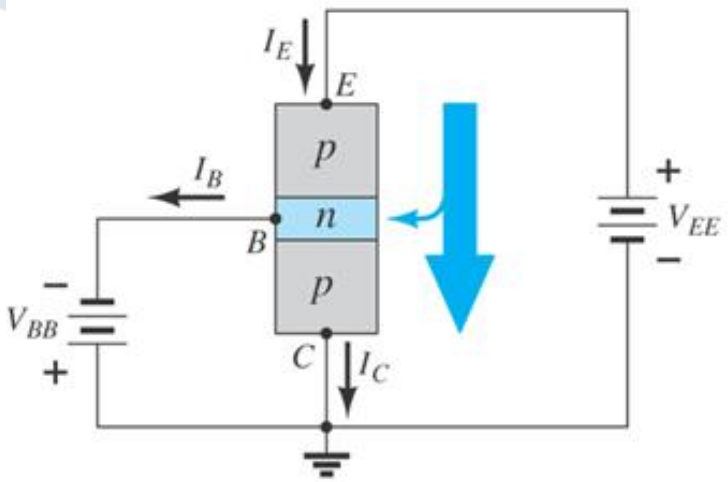
$$r_{CE} = \left.\frac{dV_{CE}}{dI_C}\right|_{I_B=ct}$$

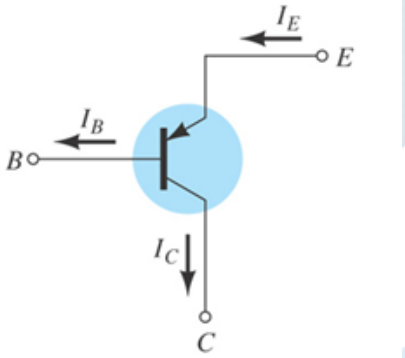


حساب معامل الربح β

$\beta_{AC} = \Delta I_C / \Delta I_B$

$\beta_{DC} = I_C / I_B$





آلية العمل الفيزيائية وتحديد تيارات الأقطاب الثلاثة في وصلة المجمع المشتركة (وصلة التابع الباعثي)

أ- لنأخذ ترانزيستور PNP: الآلية الفيزيائية المشروحة سابقا لا تتغير بتغير الوصلة ولا بتغير نصف الناقل تبقى المعادلة السابقة نفسها ولكن ستتغير جهة حوامل الشحن وبالتالي جهة التيار. بالنسبة لهذه الوصلة تصبح العلاقة بين تيارات الترانزيستور:

لدينا:

$I_E = F(I_B)$

$I_E = I_C + I_B$ و $I_C = \alpha I_E + I_{CB0}$

$I_E - I_B = \alpha I_E + I_{CB0} \Rightarrow$

بالتالي قيمة تيار المجمع بدلالة تيار القاعدة تعطى بـ:

$$I_E = (1+\beta) I_B + (1+\beta) I_{CB0} \Rightarrow$$

$$I_E = \gamma I_B + (1+\beta) I_{CB0} = \gamma I_B + I_{CE0}$$

أخذنا بعين الاعتبار: $1+\beta = 1/(1-\alpha)$ حيث ان: $I_{CE0} = (1+\beta) I_{CB0}$ يمثل تيار التسريب العكسي في الوصلة (مجمع-باعث) قيمته صغيرة جدا وتهمل أمام I_E من اجل الحصول على γ من معادلة تيار المجمع.

تمثل $\gamma = 1+\beta$ معامل ربح التيار في وصلة المجمع المشترك وتعطى بـ:

$\gamma = (I_E - I_{CE0}) / I_B$

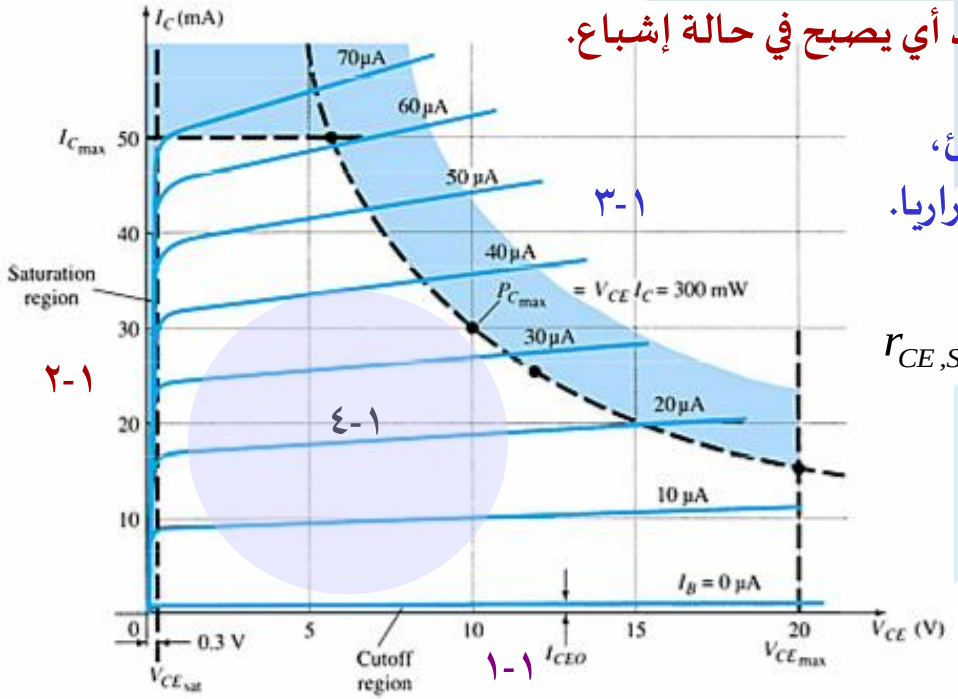
عند $I_E >> I_{CE0}$ <= $\gamma = I_E / I_B$

ملاحظات حول المميزات الساكنة للترانزيستور

١- حدود منطقة العمل أو المنطقة الفعالة لكل وصلات الترانزيستور هي:

١-١ – منطقة القطع *Cutoff Region* تبدأ مع بداية مميزة الخرج، تقع تحت منحى تيار القاعدة $I_B=0$ ، يكون المتصل $I_{CB}=on$ ويمر تيار تسريب عكسي في متصل المجمع $I_C=I_{CEO}$ لان $I_C=\beta I_B+I_{CEO}$ اما V_{CE} فتتغير قيمته من صغرى إلى عظمى.

١-٢ – منطقة الإشباع *Saturation Region* تبدأ مع بداية مميزة الخرج، تقع بجوار محور I_C ، عندما $V_{CE}=0$ يكون $I_C=0$، بزيادة لـ V_{CE} يزداد التيار I_C بسرعة حتى يصل لقيمة يثبت بعدها التيار، قيمة الجهد التي يبدأ عندها التيار بالثبات تسمى بجهد الإشباع V_{CESat} وهي قيمة صغيرة أما التيار في هذه الحالة فيسمى بتيار الإشباع $I_{Cmax}=I_{Csat}$ قيمته كبيرة ويأخذ منحى مساير لمحور الجهد أي يصبح في حالة إشباع.



١-٣ – منطقة الانهيار *Breakdown Region* محددة على المميزة بمنحى منقط على شكل قطع مكافئ، يمثل منطقة الاستطاعة المبددة $P_{max}=V_{CE}\cdot I_C$، والتي يمكن ضمنها للترانزيستور أن ينهار حراريا.

نلاحظ : أن الجهد العكسي اللازم للانهيار ينخفض بزيادة تيار القاعدة I_B.

- يحدد ميل الخواص في منطقة الإشباع بالمقاومة الديناميكية

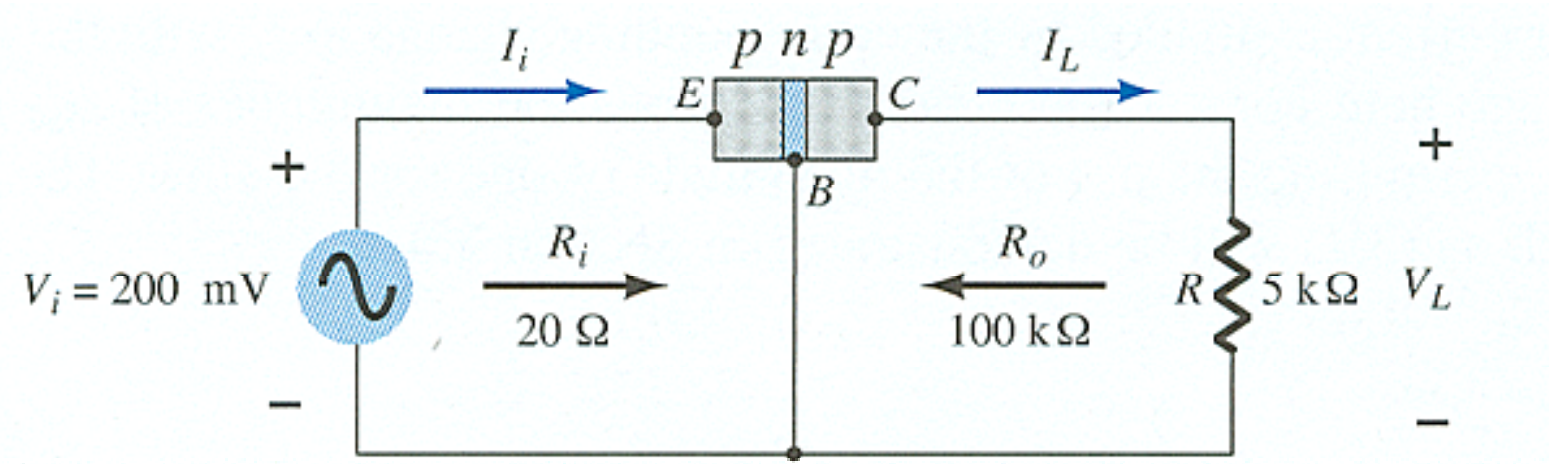
$$r_{CE,Sat}=\left.\frac{dV_{CE,Sat}}{dI_C}\right|_{I_B=ct}$$

للإشباع ذات القيم المنخفضة:

- الاستطاعة العظمى المسموحة الوصلتين: $C.C,\ P_{max}=V_{CE}\cdot I_E$ & $C.B,\ P_{max}=V_{CB}\cdot I_C$

١-٤ – منطقة العمل الفعال Active Region محددة على المميزة بالمناطق الثلاث السابقة وتختار نقطة عمل الترانزيستور في منتصف هذه المنطقة.

Transistor Amplification in CB



Currents and Voltages:

$$I_E = I_i = \frac{V_i}{R_i} = \frac{200mV}{20\Omega} = 10mA$$

$$I_C \cong I_E$$

$$I_L \cong I_i = 10\,mA$$

$$V_L = I_L R = (10\,ma)(5\,k\Omega) = 50\,V$$

Voltage Gain:

$$A_v = \frac{V_L}{V_i} = \frac{50V}{200mV} = 250$$

Practical side of BJT

الناحية العملية للترانزيستور

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS				

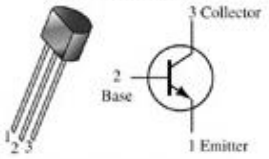
MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	2N4123	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	30	Vdc
Collector-Base Voltage	V_{CBO}	40	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EBO}	5.0	Vdc
Collector Current – Continuous	I_C	200	mAdc
Total Device Dissipation @ T_A = 25°C Derate above 25°C	P_D	625 5.0	mW mW/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J,T_{stg}	−55 to +150	°C

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	83.3	°C/W
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	200	°C/W

2N4123
CASE 29-04, STYLE 1
TO-92 (TO-226AA)



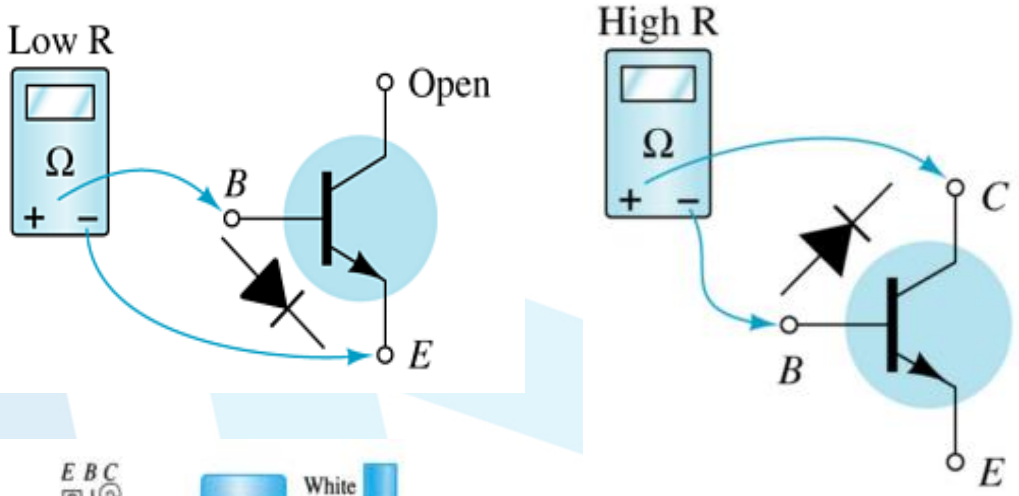
GENERAL PURPOSE
TRANSISTOR
NPN SILICON

Collector-Emitter Saturation Voltage(1) (I_C = 50 mAdc, I_B = 5.0 mAdc)	$V_{CE(sat)}$	–	0.3	Vdc
Base-Emitter Saturation Voltage(1) (I_C = 50 mAdc, I_B = 5.0 mAdc)	$V_{BE(sat)}$	–	0.95	Vdc
SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS				
Current-Gain – Bandwidth Product (I_C = 10 mAdc, V_{CE} = 20 Vdc, f = 100 MHz)	f_T	250		MHz
Output Capacitance (V_{CB} = 5.0 Vdc, I_E = 0, f = 100 MHz)	C_{obo}	–	4.0	pF
Input Capacitance (V_{EB} = 0.5 Vdc, I_C = 0, f = 100 kHz)	C_{ibo}	–	8.0	pF
Collector-Base Capacitance (I_E = 0, V_{CB} = 5.0 V, f = 100 kHz)	C_{cb}	–	4.0	pF
Small-Signal Current Gain (I_C = 2.0 mAdc, V_{CE} = 10 Vdc, f = 1.0 kHz)	h_{fe}	50	200	–
Current Gain – High Frequency (I_C = 10 mAdc, V_{CE} = 20 Vdc, f = 100 MHz) (I_C = 2.0 mAdc, V_{CE} = 10 V, f = 1.0 kHz)	h_{fe}	2.5 50	– 200	–
Noise Figure (I_C = 100 µAdc, V_{CE} = 5.0 Vdc, R_S = 1.0 k ohm, f = 1.0 kHz)	NF	–	6.0	dB

(1) Pulse Test: Pulse Width = 300 µs, Duty Cycle = 2.0%

Transistor Testing

- Curve Tracer
- Ohmmeter



Transistor Terminal Identification