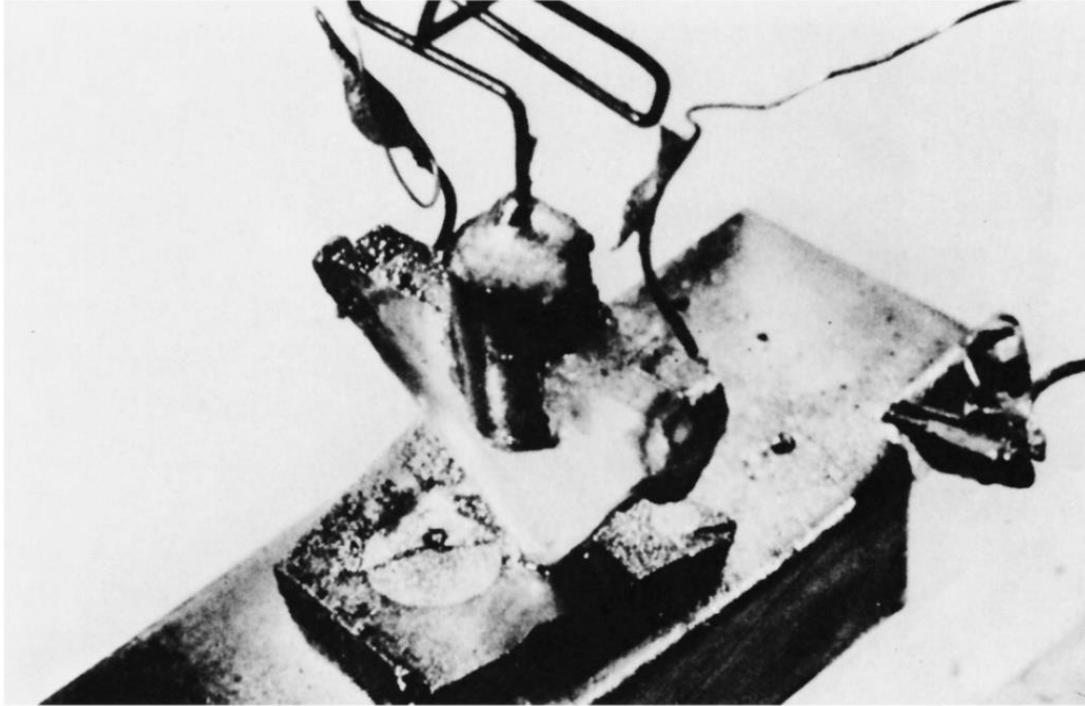


أسس الالكترونيات Basic-Electronics

الترانزستور ثنائي القطبية Bipolar Junction Transistors (BJT)

مدرس المقرر
د. السموع صالحي





-- الترانزستور (TRANSISTOR): مشتق كمصطلح من الكلمتين التاليتين، تحويل (TRANSfer) ومقاومة (reSISTOR) ويقصد به العنصر المحول للمقاومة.

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

الترانزستور الأول (مخابر شركة بل للهاتف) The first transistor



بنية الترانزستور Transistor Construction

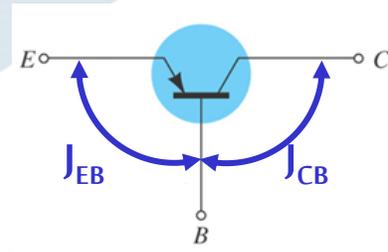
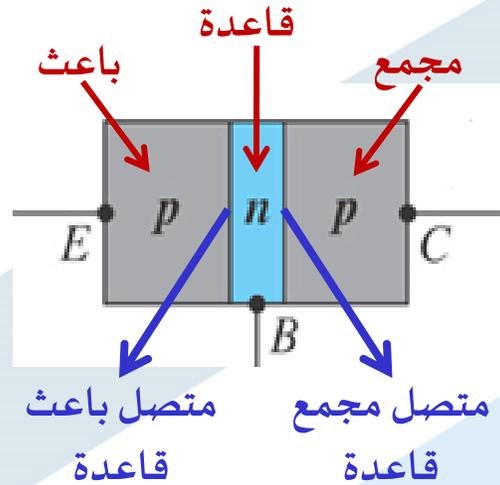
-- يتكون الترانزستور من ثلاث مناطق مصنعة من مادة نصف ناقلة

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

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

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

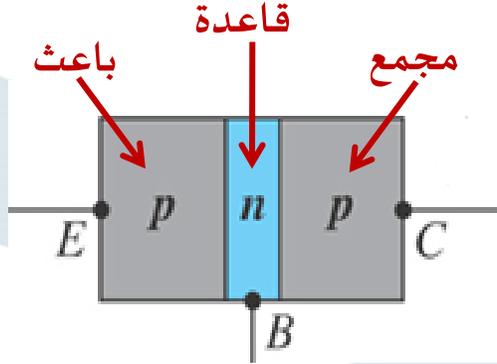
٢- المجمع (C) Collector: المنطقة اليمنى للقاعدة وهي ذات إشابة قليلة.



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

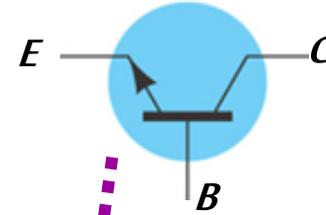


بنية الترانزيستور Transistor Construction

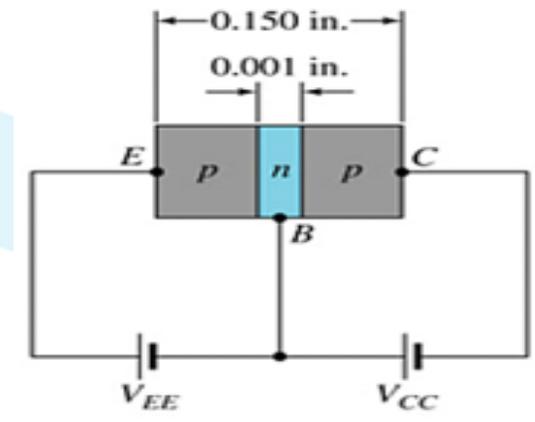
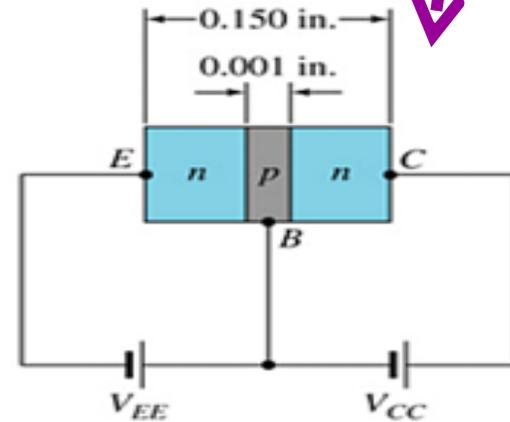


-- أنماط عمل ال BJT:

- ١- النمط الفعال، عكسي $J_{CB} = \text{off}$ & $J_{EB} = \text{on}$ ، أمامي، حقن من E وتجميع في C، نمط التضخيم.
- ٢- نمط الإشباع، $J_{CB} = \text{on}$ & $J_{EB} = \text{on}$ ، أماميان، حقن من C&E وتجميع في B.
- ٣- نمط القطع، $J_{CB} = \text{off}$ & $J_{EB} = \text{off}$ ، عكسيان، تيار المجمع يصبح معدوما تقريبا أو يساوي تيار الإشباع العكسي.
- ٤- النمط الفعال العكسي، $J_{CB} = \text{on}$ & $J_{EB} = \text{off}$ ، حقن من C وتجميع في E، عكس ١، تختلف البارامترات.



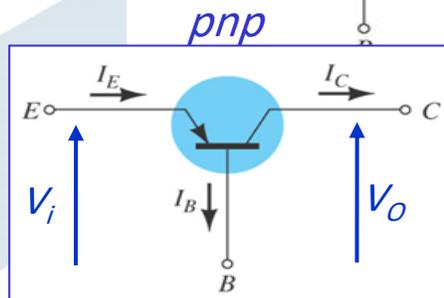
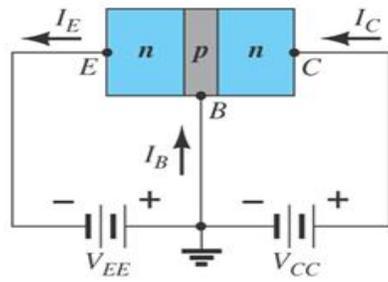
-- إذا لدينا نوعان أساسيان لـ BJT وهما PNP & NPN
npn



Circuit types of Transistor

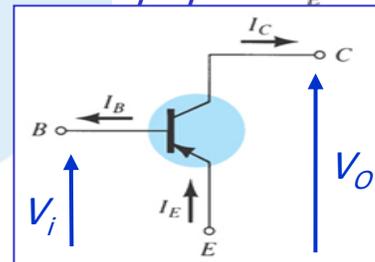
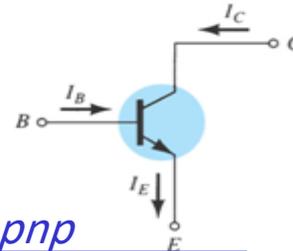
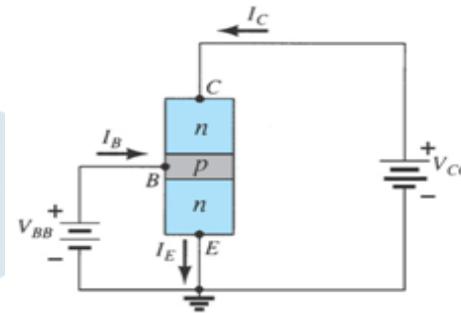
1- Common Base

دارة القاعدة المشتركة (تكون مؤرضة ومشاركة بين
دارة الدخل عبر الباعث والخرج عبر المجمع)



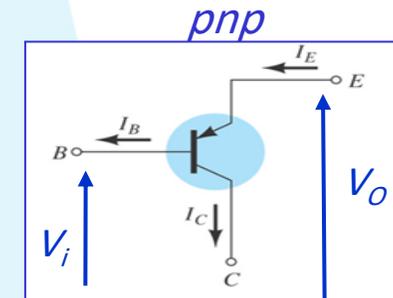
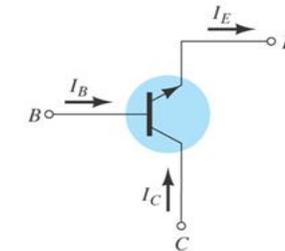
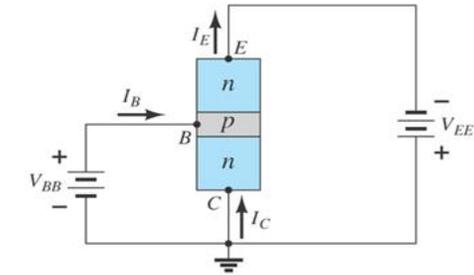
2- Common Emitter

دارة الباعث المشترك



3- Common Collector

دارة المجمع المشترك (يكون مؤرضا ومشاركا بين دارة
الدخل عبر القاعدة والخرج عبر الباعث)

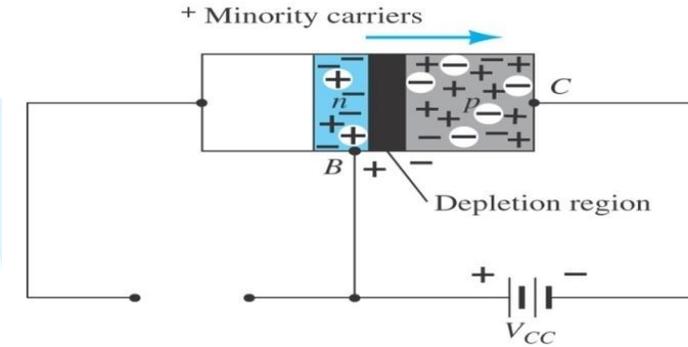
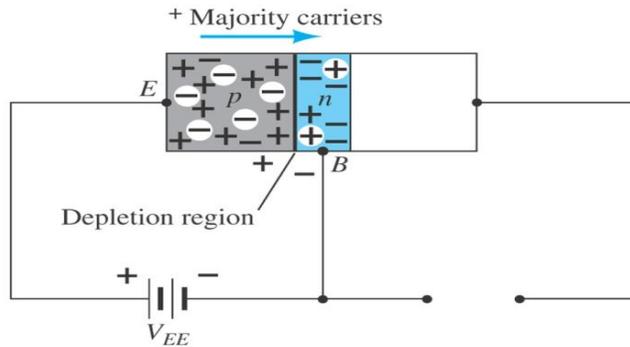


Transistor Operations

مبدأ عمل الترانزستور

آلية العمل الفيزيائية:

- يفهم مبدأ عمل الترانزستور في النظام الفعال وفي وصلة القاعدة المشتركة عن طريق تحيز كل من المتصلين $J_e = \text{on} \& J_c = \text{off}$ ثم دراسة حركة حوامل الشحن الأكثرية والأقلية لكل من النوعين npn & pnp ثم إيجاد 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 $J_e = \text{on}$ أمامي نتيجة التحيز الأمامي للجهود V_{EE} وبالتالي الحوامل الأكثرية (الثقوب) تحقن إلى القاعدة.

-- القاعدة ذات العرض القليل ستحتوي الكثير من الحوامل الأكثرية

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

-- هذا التيار سيشترك بالتيار الكلي للترانزستور



Transistor Operations

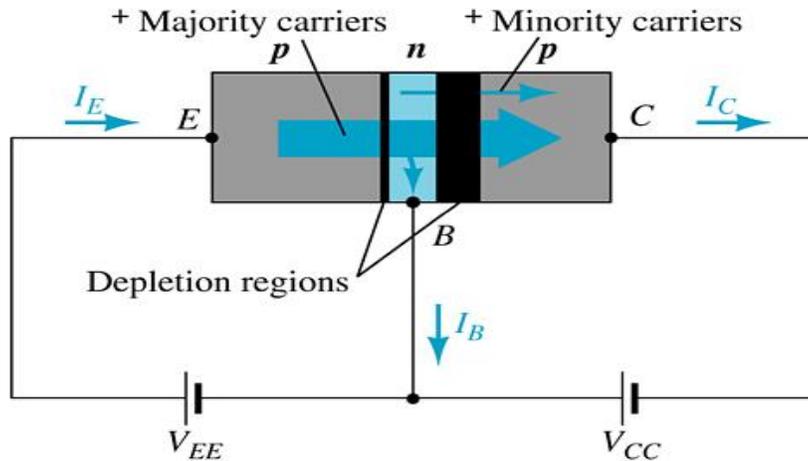
مبدأ عمل الترانزيستور

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

-- الترانزيستور يعمل في النظام الفعال أي $I_e = \text{on} \ \& \ I_c = \text{off}$ بعد عملية التحيز تحدث الآليات التالية:

١- تدفق كبير لحوامل الشحن الأخرية (الثقوب) أي تتم عملية حقن للثقوب من الباعث باتجاه القاعدة ويتكون تيار الباعث، تيار الحوامل الأخرية يعطى بـ: $I_{PE} = \gamma I_E$ حيث γ معامل الحقن و I_E عبارة عن تيار الباعث الناتج عن جذب الحوامل الأخرية (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 التسريعية للالكترونات الواردة من القاعدة لأن $I_{EN} = (1-\gamma)I_E$ وهذا التيار صغير جدا ومهمل أمام تيار الباعث لأن $\gamma \approx 1$ كون المقاومة النوعية للقاعدة أكبر من تلك للباعث.



- الثقوب المحقونة من الباعث وكون الثقوب حوامل أقلية في القاعدة سيتحد جزء منها مع الحوامل الأخرية (الالكترونات القاعدة) وتكون جزء من تيار القاعدة ستناقش هذه الحالة لاحقاً 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 I_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 أصغر من الواحد ويحدد كمية الحوامل الأكثرية الواصلة إلى المجمع.

- جزء صغير منها يتحد مع الكترولونات القاعدة مساهما بمرور تيار القاعدة، يعطى بـ: $I_{PB} = (1-x) \gamma I_E$ يختل قانون التعادل في القاعدة مما يتطلب سحب الكترولونات 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 أننا ضربنا بمعامل تضخيم M) يختل التوازن (التعادل) مما يتطلب دخول الكترولونات من سالب منبع التغذية لتعويض منتجة تيار المجمع: $I_C = M \cdot I_{PC} = \gamma x M I_E$

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

$$I_C = \gamma x M I_E + I_{CBO} \Rightarrow I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$

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

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

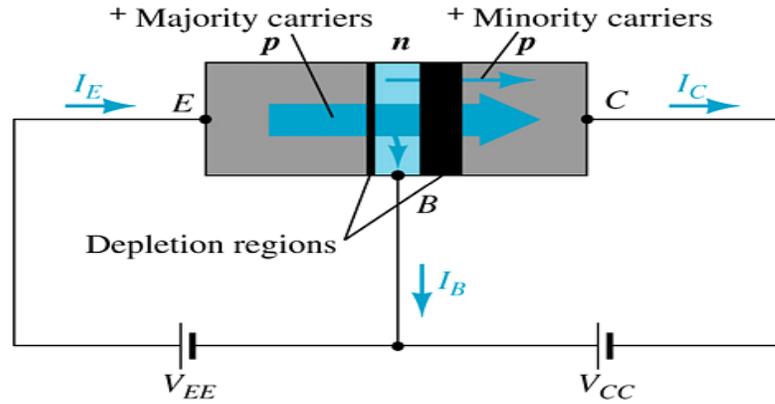


Transistor Operations

مبدأ عمل الترانزستور

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:

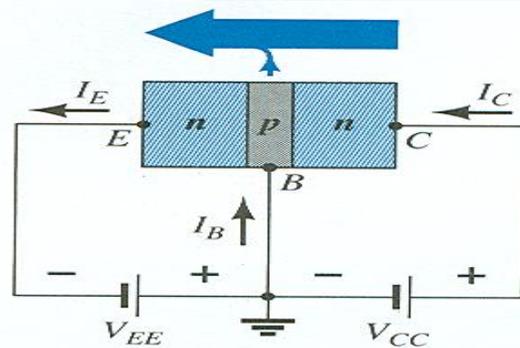


أ- تيار المجمع المتعلق بحركة الحوامل الأكثرية المحقونة من الباعث في حالتنا هي الثقوب:

$$I_C = I_{C\text{majority}} + I_{C\text{minority}} \approx \alpha I_E$$

ب. تيار القاعدة الناتج عن اتحاد بعض الحوامل الأكثرية القادمة إلى القاعدة مع الحوامل

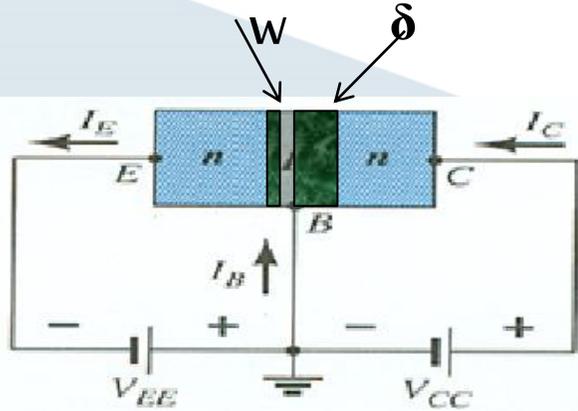
$$I_B \approx (1-\alpha)I_E \text{ لأكثرية في القاعدة ويمكن أن يعطى بـ}$$



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



Transistor Operations



لنأخذ وصلة القاعدة المشتركة: هذه الوصلة تعمل في المنطقة الفعالة أي أن: المتصل I_{EB} محيزاً أمامياً والمتصل I_{BC} عكسي.

$V_{CB} \uparrow \uparrow \Rightarrow I_{BC} \uparrow \uparrow \Rightarrow$ (يزداد عكسياً)	يزداد $\delta \uparrow \uparrow$ عرض المنطقة المجردة	$\Rightarrow w \downarrow \downarrow$ انخفاض العرض الفعال للقاعدة	زيادة $R_B \uparrow \uparrow$ مقاومة القاعدة	$\Rightarrow I_B \downarrow \downarrow \Rightarrow I_C = I_E - I_B \uparrow \uparrow$ إذا تغيرت تيار الخرج وبالتالي تغيرات في عمل الترانزستور
---	--	--	--	---

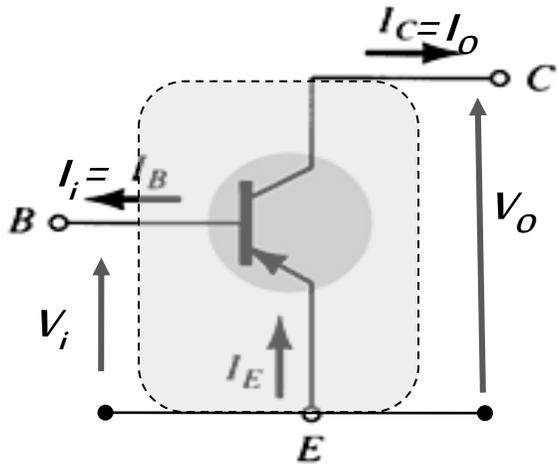
المميزات الساكنة للترانزستور BJT Static Characteristics

-- يكافئ الترانزستور مهما كانت وصلته برباعي أقطاب وتكون 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: $V_{in} = f(V_{out}) \Big|_{I_{in}=const}$

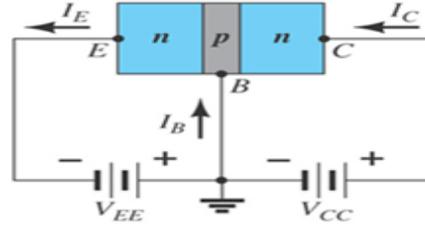
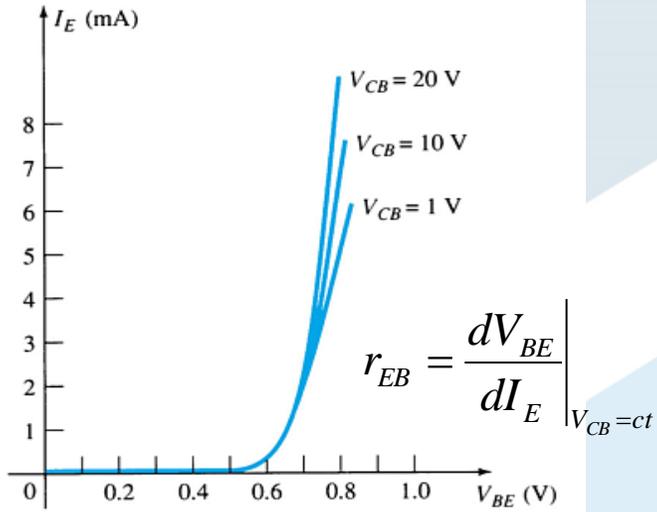


Common-Base Static Characteristics NPN

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) وجهد (V_{BE}) مع ثبات جهد الخرج العكسي (V_{CB}) الذي يزيح المميزة لليسار. مقاومة الدخل الدينامكية تعطى بـ:



المميزات الساكنة لوصلة القاعدة المشتركة

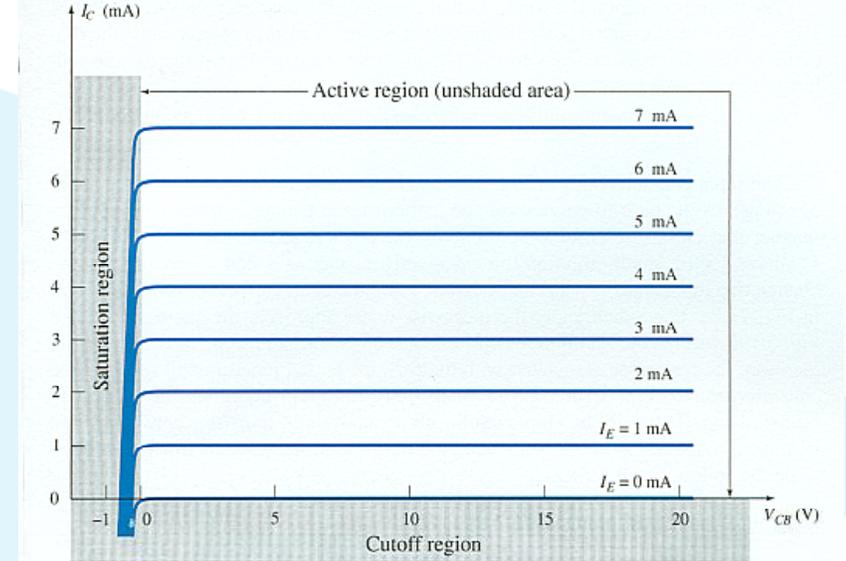
Output Characteristics مميزة الخرج

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

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

مقاومة الخرج الدينامكية تعطى بـ:

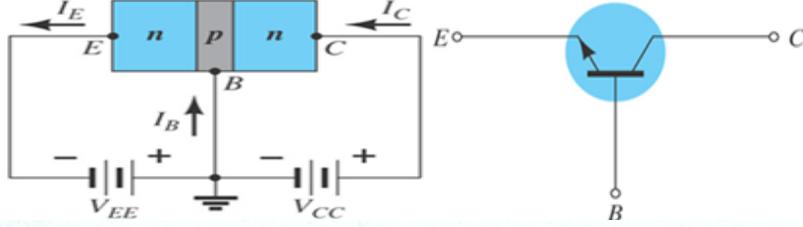
$$r_{CB} = \frac{dV_{CB}}{dI_C} \Big|_{I_B=ct}$$



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



Active region Limits in NPN

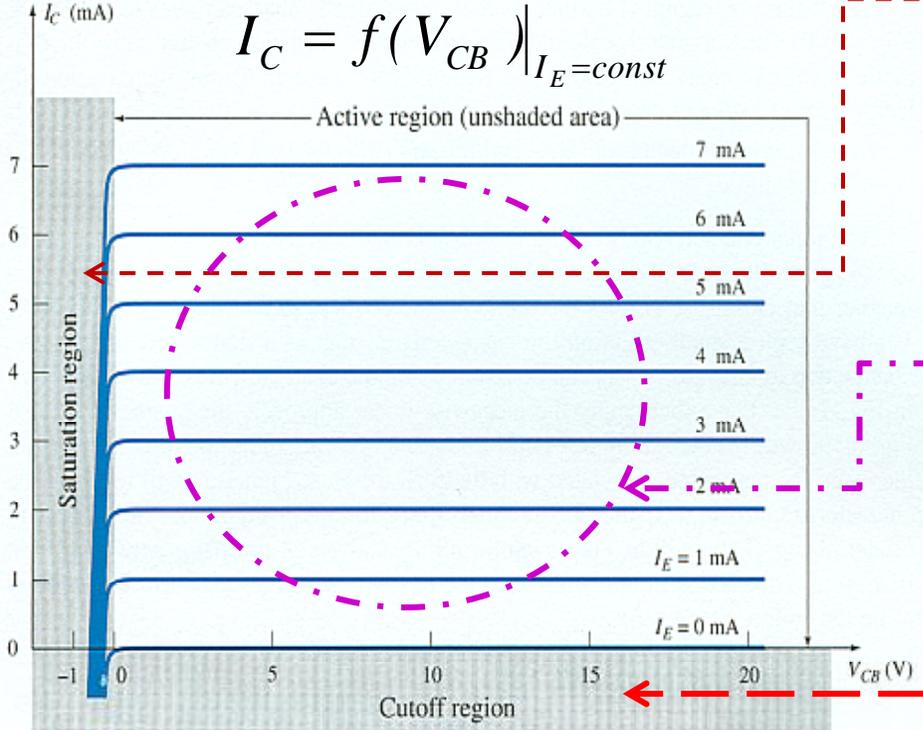


حدود المنطقة الفعالة لمميزة الخرج

*- هذه الميزة 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.

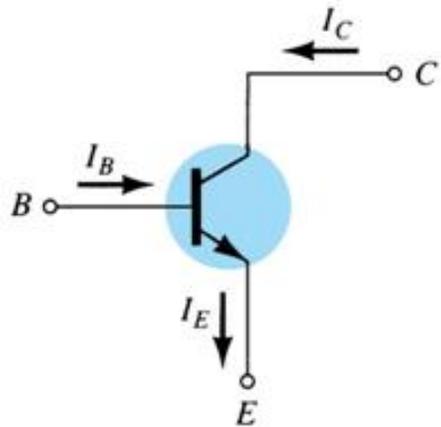
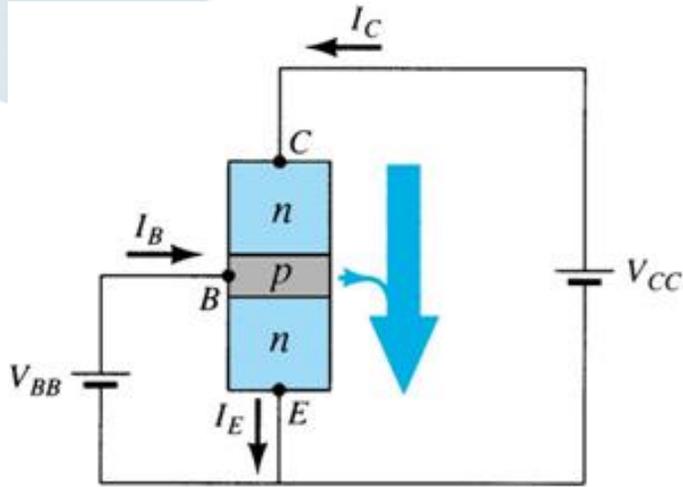
**- بزيادة الجهد العكسي يبقى تيار الخرج I_C ثابت ، تتغير قيمته بتغير I_E ، تأثير V_{CB} مهمل على I_C و يكون عندها $I_C = I_E$ هذه المنطقة تسمى المنطقة الفعالة.
***- بعد قيمة معينة للجهد يصل الترانزستور لمنطقة الانهيار ويسمى جهد الانهيار، ينقص بزيادة تيار الباعث.

****- عندما $I_E = 0$ (فتح الدخل) في هذه الحالة يمر تيار الإشباع العكسي $I_C \approx I_{CB0}$ الصغير جدا بالمقارنة مع I_C لذلك لا يظهر على الميزة، والمنطقة التي تحته هي منطقة القطع.



Transistor Operations

مبدأ عمل الترانزستور



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

أ- الآلية الفيزيائية المشروحة سابقا لا تتغير بتغير الوصلة وتبقى المعادلة السابقة نفسها ولكن بالنسبة لهذه الوصلة يجب علينا إيجاد العلاقة التالية:
لدينا:

$$I_C = F(I_B)$$

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

$$I_C = \alpha(I_C + I_B) + I_{CB0}$$

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

قيمها بحركية الحوامل الأكثرية عادة $\beta_{AC} = \beta_{DC}$ يمكن التأكد مباشرة والحساب عن طريق مميزة الخرج.

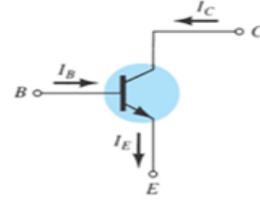
ملاحظة: جهة السهم في رسمه الترانزستور وبأي وصلة هي من P إلى N وتدل دائما على جهة تيار الباعث I_E .



Common-Emitter Static Characteristics NPN

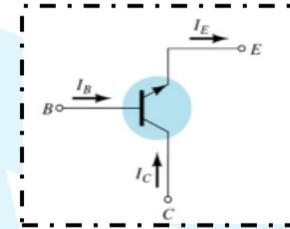
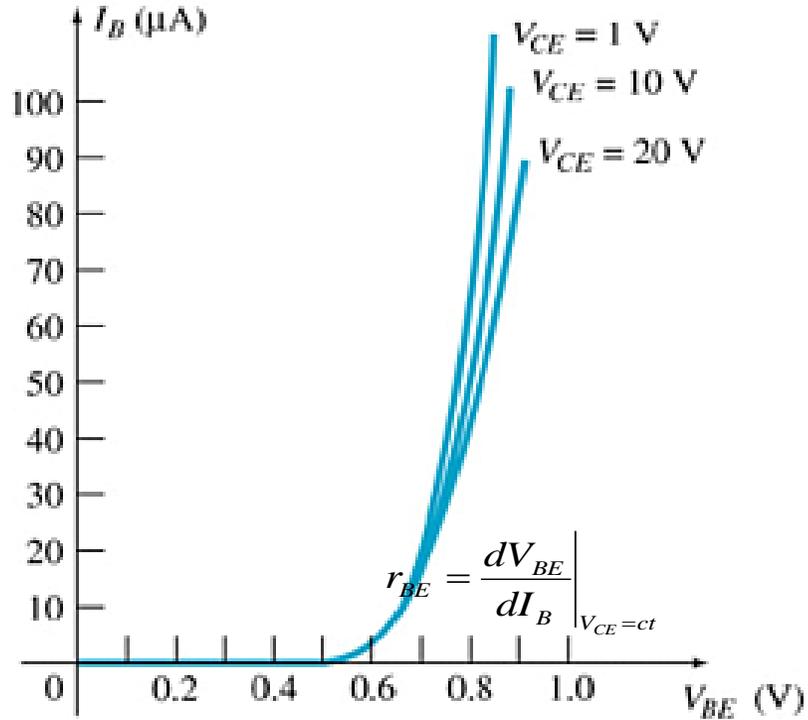
المميزات الساكنة لوصلة الباعث المشترك

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



مميزة الدخل Input (Base) Characteristics

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

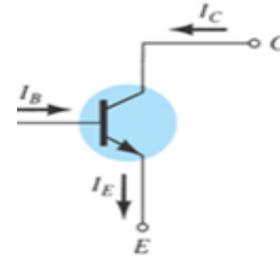


ملاحظة: المميزات الساكنة لوصلة المجمع المشترك هي نفسها للباعث المشترك ولكن نبدل في مميزة الخرج تيار المجمع بتيار الباعث.



Common-Emitter Static Characteristics NPN

المميزات الساكنة لوصلة الباعث المشترك



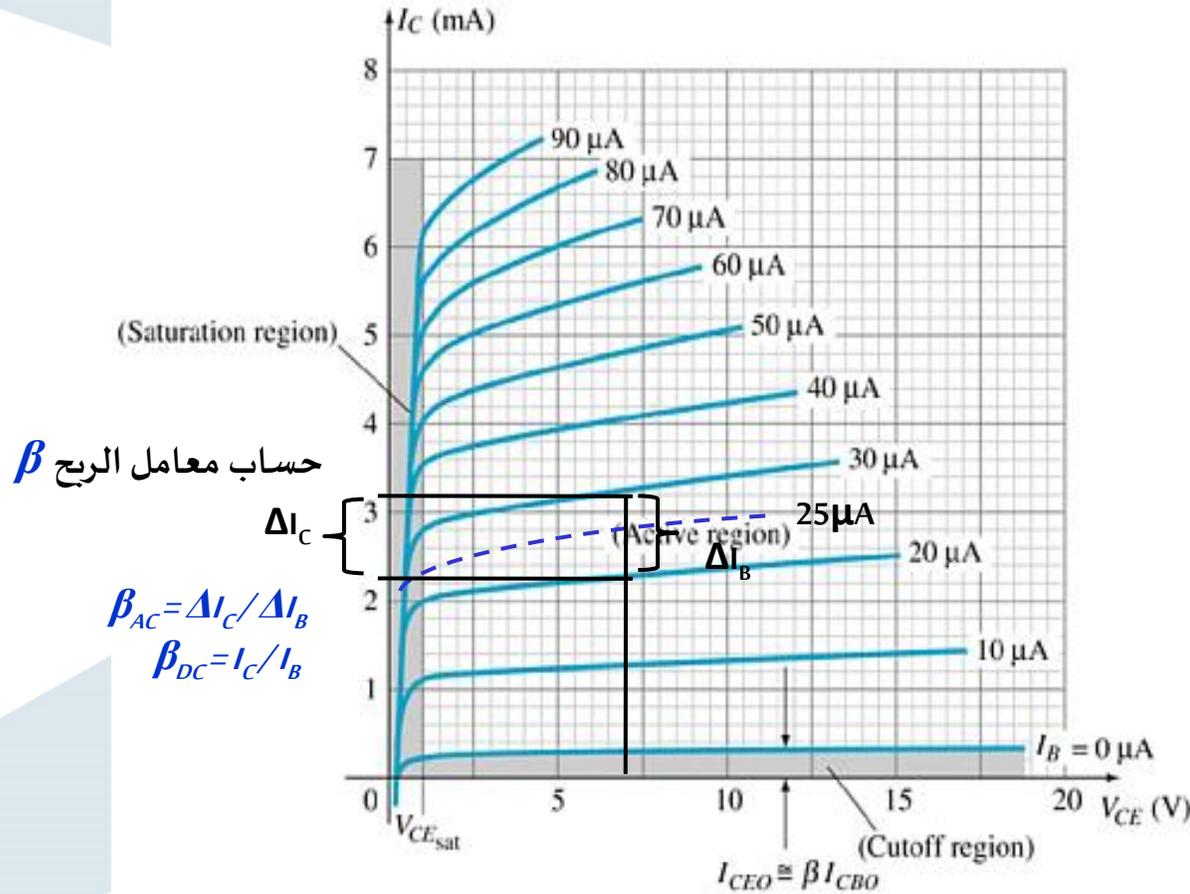
مميزة الخرج Output (Collector) Characteristics

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

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

مقاومة الخرج الدينامكية تعطى بـ:

$$r_{CE} = \frac{dV_{CE}}{dI_C} \Big|_{I_B=ct}$$



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:

$$I_E = F(I_B)$$

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

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

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

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

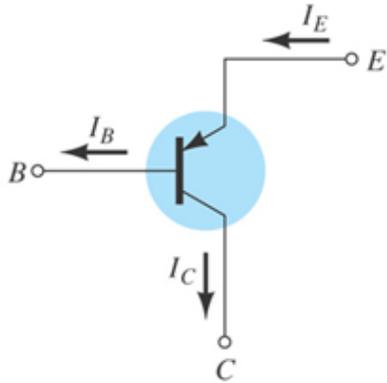
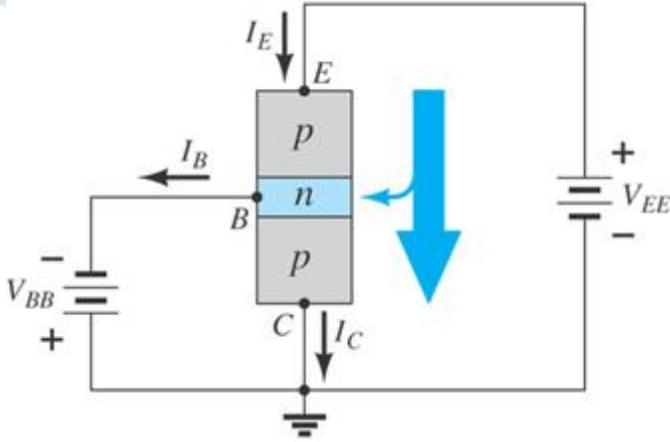
لدينا:
بالتالي قيمة تيار المجمع بدلالة تيار القاعدة تعطى بـ:

أخذنا بعين الاعتبار: $1 + \beta = 1 / (1 - \alpha)$ حيث ان: $I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CB0}$ 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:

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

$$\gamma = I_E / I_B \quad \text{عند} \quad I_E \gg I_{CEO}$$



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 منحنى 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.

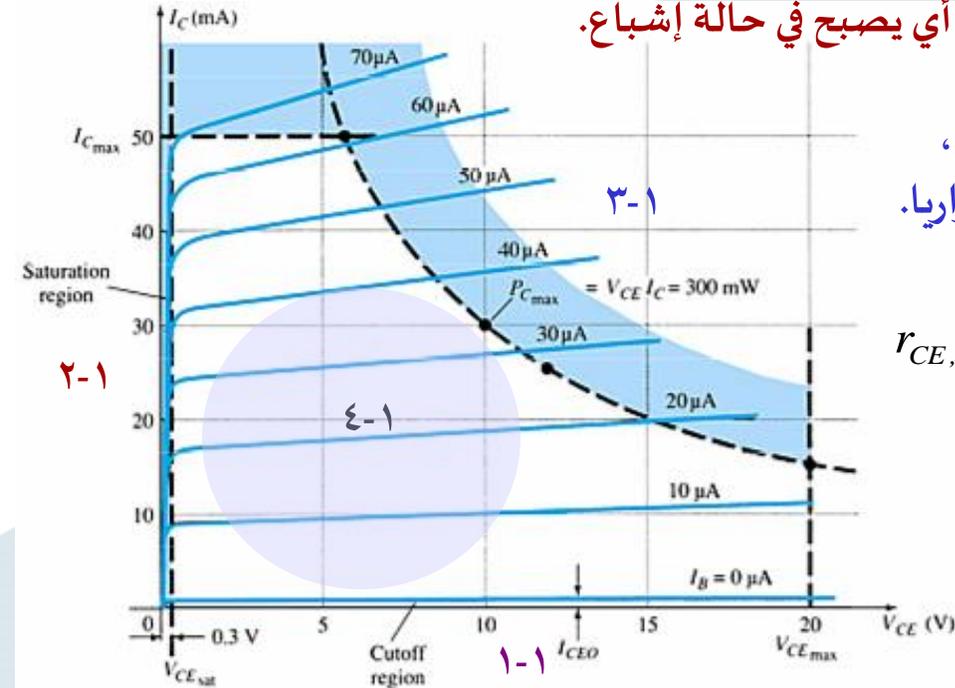
٢-١ - منطقة الإشباع Saturation Region تبدأ مع بداية مميزة الخرج، تقع بجوار محور I_C ، عندما $V_{CE}=0$ يكون $I_C=0$ ، بزيادة V_{CE} يزداد التيار I_C بسرعة حتى يصل لقيمة يثبت بعدها التيار، قيمة الجهد التي يبدأ عندها التيار بالثبات تسمى بجهد الإشباع V_{CESat} وهي قيمة صغيرة أما التيار في هذه الحالة فيسمى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

٣-١ - منطقة الانهيار Breakdown Region محددة على الميزة بمنحنى منقط على شكل قطع مكافئ، يمثل منطقة الاستطاعة المبددة $P_{max}=V_{CE} \cdot I_C$ ، والتي يمكن ضمنها للترانزيستور أن ينهار حرارياً. نلاحظ: أن الجهد العكسي اللازم للانهيار ينخفض بزيادة تيار القاعدة I_B .

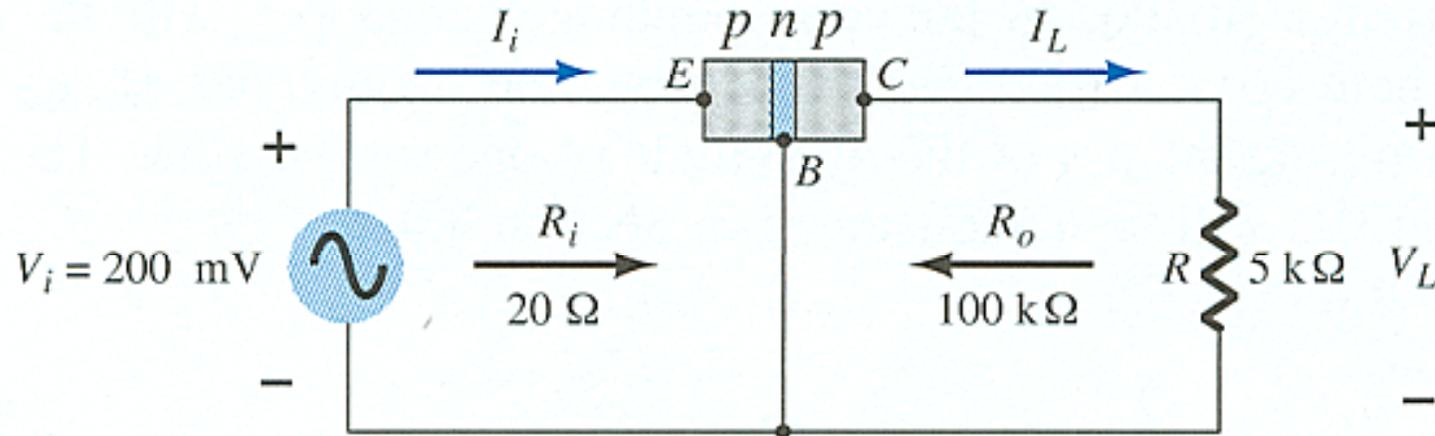
- يحدد ميل الخواص في منطقة الإشباع بالمقاومة الديناميكية للإشباع ذات القيم المنخفضة:

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

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



Transistor Amplification in CB



Currents and Voltages:

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

$$I_C \cong I_E$$

$$I_L \cong I_i = 10\text{mA}$$

$$V_L = I_L R = (10\text{ma})(5\text{k}\Omega) = 50\text{V}$$

Voltage Gain:

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



