

عام ١٩٥١ اخترع وليام شوكللي William Schockley أول ترانزستور وصلي Junction Transistor. يعتبر الترانزستور العنصر الأساسي لمعظم التطبيقات الإلكترونية مثل دوائر تكبير الإشارة، المذبذبات، السيطرة والتحكم، والتطبيقات الرقمية. ولا يخلوا أي جهاز إلكتروني في الوقت الراهن من الترانزستور بشكله المنفرد أو ان يكون مدمجاً مع ترانزستورات وعناصر أخرى على شريحة واحدة تسمى دائرة متكاملة. لفهم عمل تلك الدوائر لابد من دراسة تركيب وعمل الترانزستور.

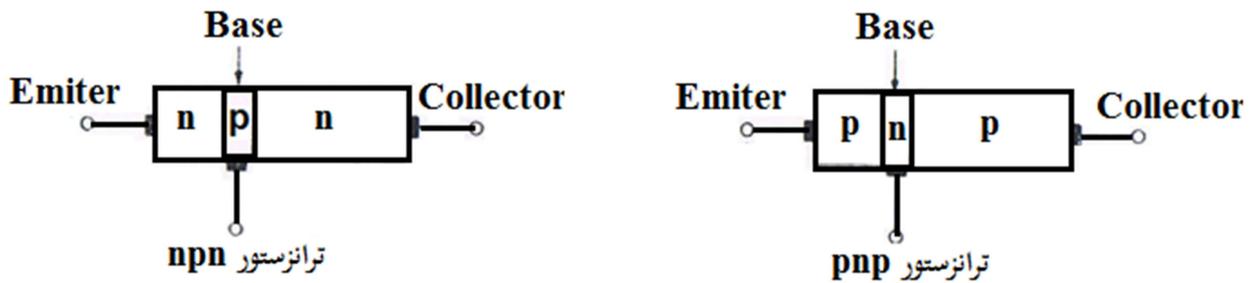
ان تسمية الترانزستور (Transistor) تمثل اختصاراً لكلمتين (TRANSfer-resISTOR) أي بمعنى "مقاوم الانتقال" وجاءت تلك التسمية لما يمتاز به الترانزستور من قابلية نقل تيار من منطقة ذات مقاومة واطئة إلى منطقة ذات مقاومة عالية دون ان يرافق ذلك فقدان ملحوظ في قيمة ذلك التيار. بشكل عام هناك نوعان أساسيان للترانزستور وذلك تبعاً لنوعية حاملات الشحنة التي تكوّن التيار المار عبره، وهي:

- ١- الترانزستور ثنائي القطبية الوصلي (Bipolar Junction Transistor): يتكون تيار التوصيل فيها من كلا نوعي حاملات الشحنة (الإلكترونات الحرة و الفجوات)، ويرمز لها اختصاراً BJT.
- ٢- الترانزستور أحادي القطبية الوصلي (Unipolar Junction Transistor): يتكون تيار التوصيل فيها من نوع واحد من حاملات الشحنة (الإلكترونات الحرة أو الفجوات)، ومن اهم أنواعه ترانزستور تأثير المجال (Field Effect Transistor) FET.

سيخصص هذا الفصل والذي يليه لدراسة تركيب وخصائص وتطبيقات النوع الأول، اما النوع الثاني فسننتاوله في فصول لاحقة.

١.٥ تركيب الترانزستور ثنائي القطبية BJT وأنواعه

الترانزستور هو نبيطة ثلاثية الأطراف، ويتكون من ثلاث مناطق تكون المنطقة الوسطى من شبه موصل من نوع معين (شبه موصل سالب أو موجب) بينما تكون المنطقتين الطرفيتين من شبه موصل من النوع الآخر. وبذلك يكون هناك نوعان من ترانزستور BJT وهما ترانزستور من نوع npn و ترانزستور من النوع pnp. الشكل (١-٥) يوضح مخطط لنوعي الترانزستور.



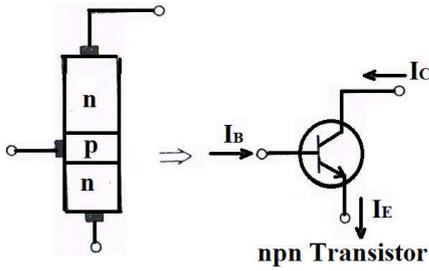
شكل ١-٥: مخطط لنوعي الترانزستور ثنائي القطبية

يتكون ترانزستور BJT من ثلاث مناطق هي كالتالي:

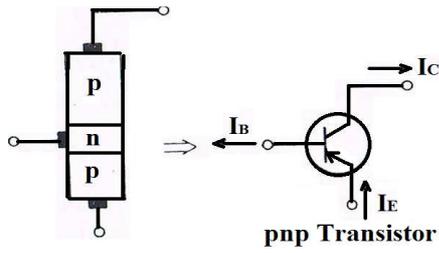
الباعث (Emitter): يمتاز بغزارة التطعيم ويعمل على بَعث (حقن) الإلكترونات إلى منطقة القاعدة.

القاعدة (Base): تكون القاعدة خفيفة التطعيم و رقيقة وتعمل على إمرار معظم الإلكترونات المنبعثة من منطقة الباعث إلى منطقة الجامع.

الجامع (Collector): يتراوح تطعيم بين تطعيم الباعث العزير وتطعيم القاعدة الخفيف، وتعمل على جمع الإلكترونات من منطقة القاعدة، وتكون منطقة الجامع هي المنطقة الأكبر بين المناطق الثلاث لان عليه ان يبدد حرارة اكثر من منطقتي الباعث والقاعدة.



الشكل المجاور يمثل رمز ترانزستور npn حيث تمثل القاعدة الطرف الوسطي بينما يُميّز طرف الباعث عن الجامع بإضافة سهم يمثل اتجاه تيار الباعث الاصطلاحي.



بالمقابل الشكل المجاور يمثل رمز ترانزستور من النوع pnp حيث يلاحظ ان الاختلاف يكون في اتجاه السهم لطرف الباعث حيث يكون مشيراً الى الداخل.

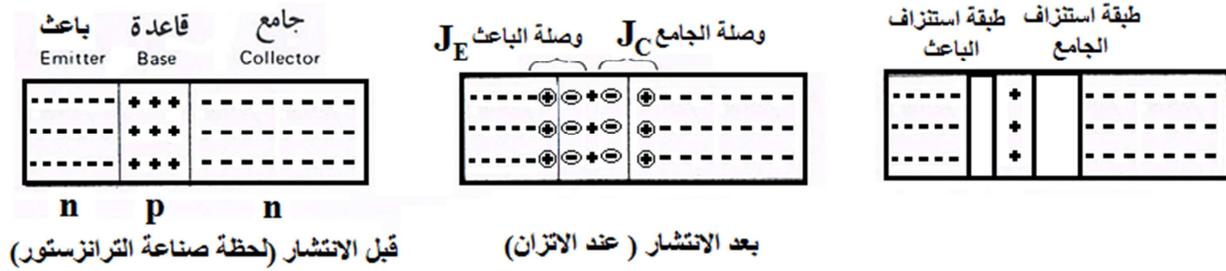
سوف نركز في دراستنا على الترانزستور من النوع npn المصنوع من السليكون.

٢.٥ مخطط حزم الطاقة للترانزستور BJT غير المنحاز

في لحظة صناعة الترانزستور من النوع npn ونظراً لاختلاف تركيز حاملات الشحنة تنتقل الإلكترونات الحرة من جهة الباعث الى جهة القاعدة وكذلك من جهة الجامع باتجاه القاعدة ونتيجة لذلك تتكوّن طبقتي استنزاف ولكل طبقة استنزاف جهد حاجز (0.7V في حالة السليكون) عند درجة حرارة الغرفة.

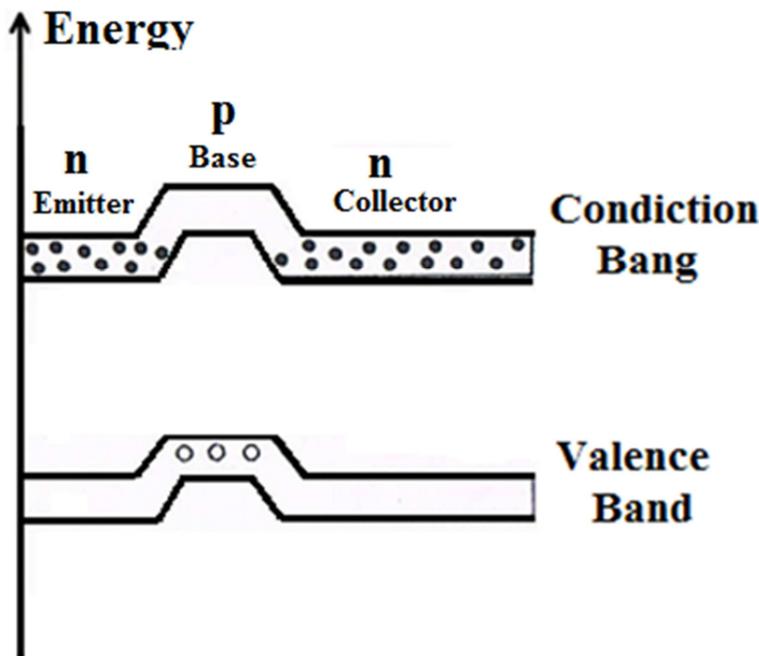
بما ان المناطق الثلاث لها نسب تطعيم مختلفة لا يكون لطبقتي الاستنزاف نفس العرض، فكلما كان تطعيم منطقة ما غزيراً كان تركيز الايونات قرب الوصلة اكبر، وهذا يعني ان طبقة الاستنزاف تنفذ قليلاً فقط في منطقة الباعث (غزير التطعيم) ولكنها تنفذ عميقاً في منطقة القاعدة (خفيفة التطعيم)، وكذلك فان طبقة

الاستنزاف الثانية تمتد كثيراً في القاعدة بينما تنفذ في منطقة الجامع بعمق اقل وكما هو موضح بالشكل (٢-٥).



شكل (٢-٥) طبقة الاستنزاف في ترانزستور npn

لفهم اكثر نناقش حزم الطاقة لخصائص الترانزستور npn غير المنحاز، كما هو الحال في ثنائي شبه الموصل تكون حزمة طاقة منطقة القاعدة (جهة p) اعلى قليلاً من حزم طاقة جهتي الباعث والجامع (لماذا؟)، ويكون لدينا تلين للطاقة كما هو موضح بالشكل التالي. نتيجة لذلك فان الالكترونات الحرة الموجودة في جهة الباعث لن تستطيع الانتقال الى جهة القاعدة وذلك لعدم امتلاكها الطاقة الكافية، ولأجل ان يسري تيار عبر الترانزستور لابد من تسليط فرق جهد خارجي على اطراف الترانزستور وهذا ما سنتناوله في الفقرة التالية.



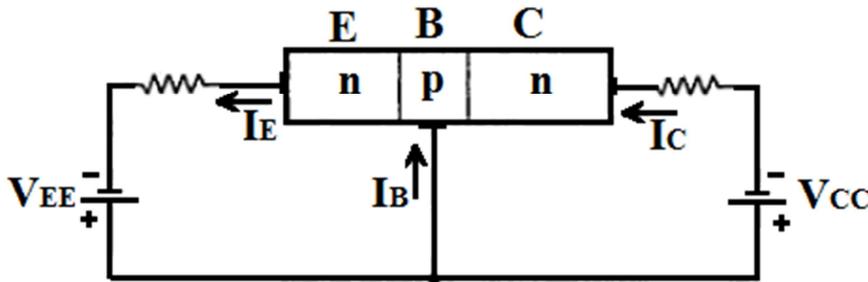
شكل (٣-٥) حزم الطاقة لترانزستور npn غير المنحاز

٣.٥ أنواع الانحياز للترانزستور

هناك ثلاثة أنواع أساسية لتحيز الترانزستور وهي كالتالي:

أولاً: انحياز أمامي-أمامي FF

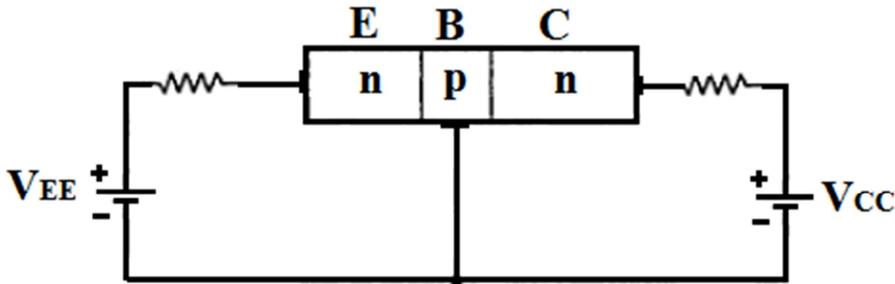
في هذا النوع يتم تحيز وصلة الباعث أمامياً و وصلة الجامع أمامياً وكما هو موضح (٤-٥). بعد ان تغلب فولتية التحيز الامامية (V_{EE}) على جهد الحاجز لوصلة الباعث يسري تيار I_E ، وبالمقابل عند تغلب فولتية تحيز الجامع (V_{CC}) على جهد الحاجز لوصلة الجامع يمر تيار الجامع (I_C)، ويمكن تصور عمل الترانزستور في هذه الحالة كعمل مفتاح مغلق.



شكل (٤-٥) ترانزستور npn في حالة انحياز امامي-امامي

ثانياً: انحياز عكسي-عكسي RR

في هذه الحالة فان وصلتي الباعث والجامع تكون منحازة عسياً كما هو موضح بالشكل (٥-٥)، ونتيجة لذلك يسري تيار صغير جداً مكونة من حاملات الشحنة الاقلية المتولدة حرارياً، في الظروف الاعتيادية يمكن اهمال تلك التيارات ويمكن اعتبار الترانزستور المنحاز عكسي-عكسي بمثابة مفتاح مفتوح.



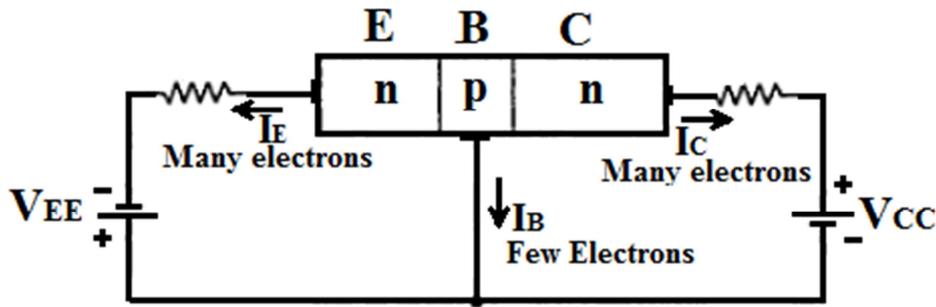
شكل (٥-٥) ترانزستور npn في حالة انحياز عكسي-عكسي

ثالثاً: انحياز أمامي-عكسي FR

يعتبر هذا النوع من الانحياز اهم انواع الانحياز واكثرها استعمالاً، وفيه يتم تحييز وصلة الباعث امامياً بينما يتم تحييز وصلة الجامع عكسياً كما هو موضح بالشكل (٥-٦). في هذه الحالة نتوقع تيار باعث كبير (انحياز امامي) وتيار جامع صغير (انحياز عكسي)، غير انه وخلافاً لذلك المتوقع، فاننا نحصل على تيار جامع كبير (اقل بقليل من تيار الباعث) على الرغم من الانحياز العكسي المسلط، وهذه الميزة هي التي جعلت الترانزستور ذلك الاختراع المهم.

وفيما يلي شرح لكيفية حدوث ذلك الامر غير المتوقع:

- نظراً لكون وصلة الباعث منحاز امامياً فانه سوف يسري تيار امامي كبير عبر الباعث باتجاه القاعدة (I_E) وذلك متى ما تغلب فولتية التحييز الامامية على جهد الوصلة للباعث (V_{BE}).
- نظراً لكون منطقة القاعدة ضعيفة التطعيم ورقيقة فأن معظم (حوالي 95%) الالكترونات الحرة المحقونة من جهة الباعث سوف تتمكن من عبور منطقة القاعدة الى طبقة استنزاف الجامع، وعندها يقوم مجال طبقة استنزاف الجامع بدفع تيار ثابت من الالكترونات الى منطقة الجامع ومن ثم تغادر تلك الالكترونات الى سلك توصيل الجامع الخارجي ثم تجري الى الطرف الموجب من مصدر فولتية تحييز الجامع (V_{CC}). وبالنتيجة نحصل على تيار جامع كبير على الرغم من الانحياز العكسي له، ومن ذلك يمكنك ادراك لماذا سمي الترانزستور بمقاوم الانتقال، اذ انه تمكن من نقل تيار من منطقة ذات مقاومة صغيرة (وصلة الباعث المنحازة امامياً) الى منطقة ذات مقاومة عالية (وصلة الجامع المنحازة عكسياً) من دون فقدان محسوس. الشكل التالي يوضح الانحياز الامامي-عكسي.

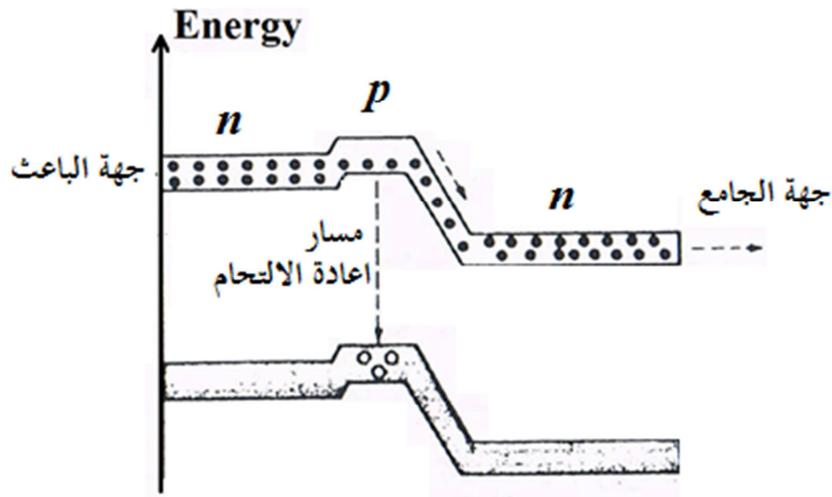


شكل (٥-٦) ترانزستور npn في حالة انحياز أمامي-عكسي

للتوضيح اكثر نناقش المسألة من وجهة نظر حزم الطاقة، الشكل (٥-٧) يوضح تأثير الانحياز امامي-عكسي على حزم الطاقة لترانزستور BJT، حيث نلاحظ ان الانحياز الامامي لوصلة الباعث يؤدي الى تقليل ثل الطاقة لوصلة الباعث وعندها تتمكن الالكترونات الحرة التي تمتلك الطاقة الكافية في جهة الباعث من الانتقال الى حزمة توصيل منطقة القاعدة. تصبح تلك الالكترونات عند دخولها الى حزمة توصيل القاعدة بمثابة حاملات الشحنة الاقلية (لانها داخل منطقة p)، في أي ترانزستور تقريباً يمتلك 95%

من حاملات الاقلية تلك زمن بقاء يكفيها لنتشر الى طبقة استنزاف الجامع وتتحدر الى اسفل تل طاقة الجامع وعند انحدار الالكترونات من على تل الطاقة تحرر طاقة والتي تكون غالباً على شكل حرارة، ويجب على الجامع ان يكون قادراً على تبديد تلك الحرارة، ولهذا السبب يكون الجامع هو الاكبر بين مناطق التطعيم الثلاث. من ناحية ثانية فان المتبقي (5%) من الالكترونات الباعث المحقونة تسقط على طول طريق اعادة الالتحام المبين بالشكل حيث تصبح الكترونات تكافؤية تسير عبر فجوات القاعدة الى سلك التوصيل الخارجي.

نلاحظ مما سبق ان الانحياز الامامي لوصلة الباعث يسيطر على عدد الالكترونات المحقونة الى القاعدة وكلما زادت فولتية التحيز الامامية زاد عدد الالكترونات المحقونة. بينما يكون للانحياز العكسي لوصلة الجامع تأثير قليل على عدد الالكترونات التي تدخل الجامع، وزيادة الجهد العكسي يزيد من انحدار تل طاقة الجامع ولكنه لا يغير عدد الالكترونات الواصلة الى طبقة استنزاف الجامع تغيراً ملحوظاً.



شكل (٧-٥) مخطط حزم الطاقة ترانزستور npn في حالة انحياز أمامي-عكسي

٤.٥ المعامل β_{dc} والمعامل α_{dc} والعلاقة بينهما

يعرف المعامل β_{dc} بأنه النسبة بين تيار الجامع الى تيار القاعدة في ظروف العمل الساكنة (dc)، كما يسمى كذلك بمعامل كسب التيار المستمر وكما يرمز له كذلك بالرمز (h_{FE}) ، اي ان:

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B} \quad (5-1)$$

وتكون قيمته لمعظم الترانزستورات اكبر من 20 وهو يتراوح عادة من 50 الى 300 ، علماً بأنه في بعض الترانزستورات الخاصة يمكن ان تصل قيمته الى 1000.

اما المعامل α_{dc} فيعرف بانه النسبة بين تيار الجامع الى تيار الباعث في ظروف العمل الساكنة (dc). اي ان:

$$\alpha_{dc} = \frac{I_C}{I_E} \quad (5-2)$$

وحيث ان تيار الجامع يكون عادة اقل بقليل من تيار الباعث لذا تكون قيمة المعامل α_{dc} اقل بقليل من الواحد، يمكن اشتقاق العلاقة التي تربط بين المعاملين β_{dc} و α_{dc} وكما يلي:

من قانون كيرشوف الخاص بالتتيار (المجموع الجبري للتيارات الداخلة والخارجة في أي نقطة في أي دائرة كهربائية مغلقة يساوي صفر) لدينا:

$$I_E = I_C + I_B \quad (5-3)$$

بقسمة طرفي المعادلة (3-5) على I_C نحصل على:

$$\frac{I_E}{I_C} = 1 + \frac{I_B}{I_C}$$

من تعريف المعاملين α_{dc} و β_{dc} لدينا: $\alpha_{dc} = \frac{I_C}{I_E}$, $\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B}$ وبالتعويض في المعادلة الاخيرة نحصل على:

$$\frac{1}{\alpha_{dc}} = 1 + \frac{1}{\beta_{dc}}$$

وبترتيب الحدود يمكننا إيجاد المعامل α_{dc} بدلالة المعامل β_{dc} وكما يلي:

$$\frac{1}{\alpha_{dc}} = \frac{\beta_{dc} + 1}{\beta_{dc}}$$

ومنه نجد:

$$\alpha_{dc} = \frac{\beta_{dc}}{\beta_{dc} + 1} \quad (5-4)$$

وبنفس الطريقة يمكننا ان نجد المعامل β_{dc} بدلالة المعامل α_{dc} ، حيث نجد:

$$\beta_{dc} = \frac{\alpha_{dc}}{1 - \alpha_{dc}} \quad (5-5)$$

مثال (٥-١): ترانزستور سليكون محيز بطريقة امامي-عكسي، له $(\beta_{dc}=50)$ وتيار الجامع يساوي $(10mA)$ ، اوجد كل من تيار القاعدة وتيار الباعث.

الحل: من معطيات المثال لدينا: $\beta_{dc} = 50, I_C = 10mA, I_B = ?, I_E = ?$

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

من تعريف معامل كسب التيار المستمر لدينا:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{dc}} \Rightarrow I_B = \frac{10}{50} \Rightarrow \boxed{I_B = 0.2mA}$$

ومنه نجد:

$$I_E = I_C + I_B \Rightarrow I_E = 10 + 0.2 \Rightarrow \boxed{I_E = 10.2mA}$$

٥.٥ طرق ربط ترانزستور BJT (BJT Configurations)

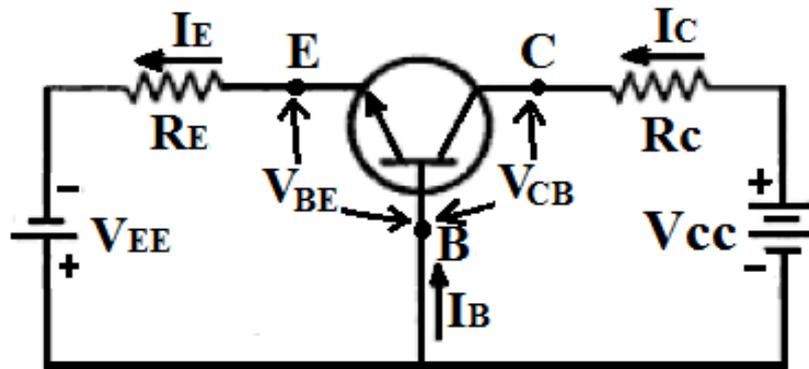
هناك ثلاث طرق لربط الترانزستور وهي:

- ١- ربط القاعدة المشترك (Common Base Configuration (CB)
- ٢- ربط الباعث المشترك (Common Emitter Configuration (CE)
- ٣- ربط الجامع المشترك (Common Collector Configuration (CC)

بصرف النظر عن طريقة الربط لمعتمدة فإن وصلة الباعث تحيز امامياً، بينما يتم تحييز وصلة الجامع عكسياً وذلك لجعل الترانزستور عاملاً في منطقة العمل. وفيما يلي شرح لكل طريقة ربط.

أولاً: ربط القاعدة المشترك Common Base Configuration

الشكل (٥-٨) يوضح ربط القاعدة المشترك لترانزستور BJT من النوع npn، حيث نجد ان طرفي الإدخال يمثله طرفي الباعث-القاعدة بينما يكون طرفي الإخراج هما طرفي الجامع-القاعدة، ويكون طرف القاعدة مشترك بين طرفي الإدخال والإخراج.



شكل (٥-٨) ربط القاعدة المشترك لترانزستور npn

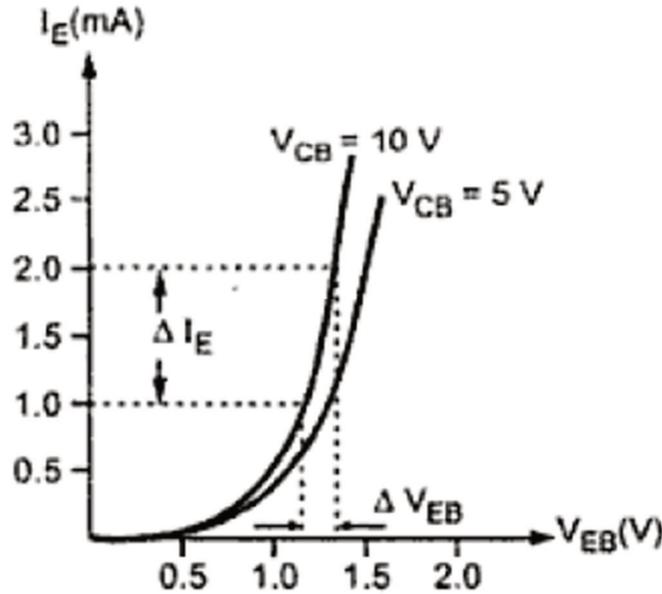
عند دراسة خواص ربط معين تتم دراسة خواص الإدخال للدائرة (العلاقة بين تيار الإدخال وفولتية الإدخال) بمعزل على خواص الإخراج (العلاقة بين تيار الإخراج وفولتية الإخراج)، وهنا يجب الانتباه الى ان هناك دائماً عامل من احدهما يؤثر على الآخر.

أ- خواص الإدخال لربط القاعدة المشترك

الشكل (٩-٥) يمثل منحنيات الإدخال، حيث نلاحظ انها تتمثل بعائلة منحنيات تمتاز بالخاصيتين:

١- لكل منحنى (معينة V_{CB}) نجد ان تيار الإدخال (I_E) يبدأ بزيادة كبيرة عندما تتغلب فولتية الإدخال على جهد الحاجز لوصلة الباعث ($0.7V$ لترانزستور السليكون و $0.3V$ لترانزستور الجرمانيوم)، وبعد ذلك فإن أي زيادة بسيطة في فولتية الإدخال (V_{BE}) يرافقها زيادة كبيرة في تيار الإدخال، وهذا يعني ان مقاومة الإدخال صغيرة جداً (بحدود 100Ω).

٢- عند زيادة V_{CB} نجد ان ذلك يؤدي الى زيادة بسيطة في تيار الادخال (I_E) لفولتية ادخال (V_{EB}) معينة.



شكل (٩-٥) منحنيات خواص الإدخال لربط القاعدة المشترك لترانزستور npn

ب- خواص الإخراج لربط القاعدة المشترك

الشكل (١٠-٥) يمثل منحنيات الإخراج لربط القاعدة المشترك، نلاحظ ان هناك ثلاث مناطق مميزة

وهي:

١- المنطقة الفعالة (Active region): وتسمى هذه المنطقة ايضاً بمنطقة العمل (Operation

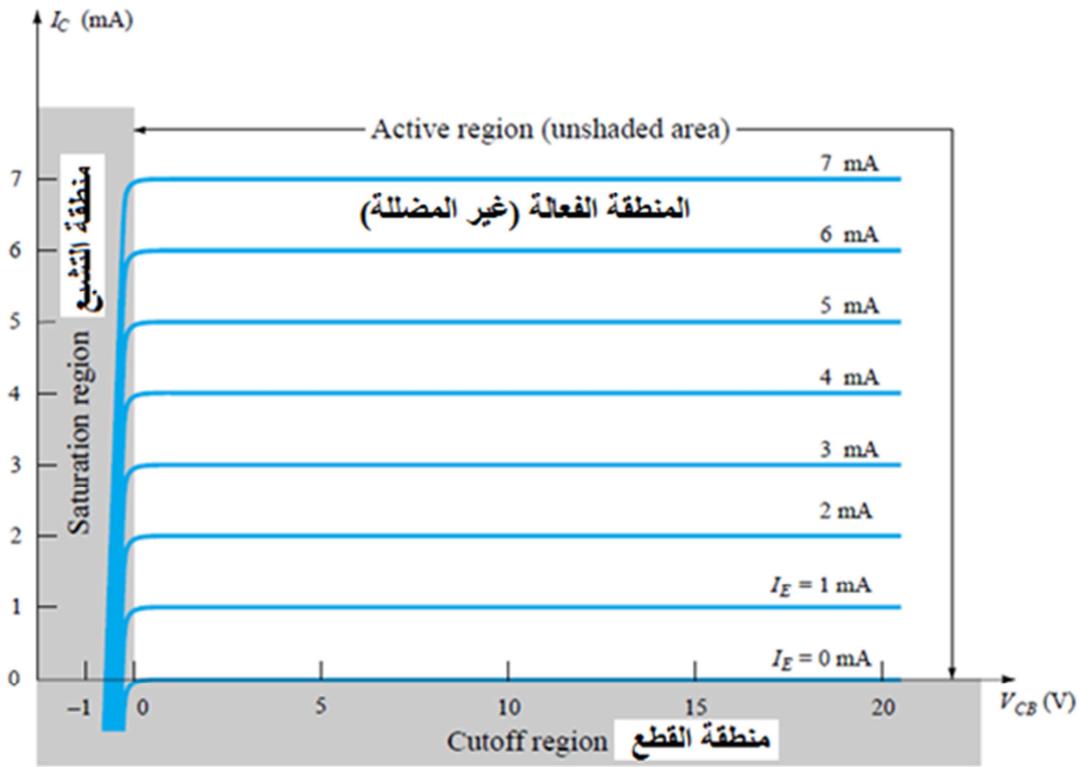
region)، في هذه المنطقة تكون وصلة الباعث منحازة امامياً و وصلة الجامع منحازة عكسياً، حيث

نلاحظ ان زيادة فولتية الإخراج V_{CB} تؤدي الى زيادة بسيطة جداً في تيار الإخراج مما يدل الى ان

مقاومة الاخراج عالية جداً (بحدود $500k\Omega$) ونلاحظ كذلك ان تيار الاخراج (I_C) يكون اقل بقليل من تيار الادخال (I_E)، وهذا يعني ان كسب التيار لربط القاعدة المشترك يكون اقل من الواحد، وحيث ان تيار الاخراج اقل بقليل من تيار الادخال ومقاومة الادخال صغيرة جداً ومقاومة الاخراج عالية جداً تكون فولتية الاخراج اكبر بكثير من فولتية الادخال، اي ان كسب الفولتية لربط القاعدة المشترك يكون كبيراً جداً.

٢- منطقة القطع (Cut-off region): في هذه المنطقة تكون وصلتي الباعث والجامع منحازة عكسياً ويتصرف الترانزستور كدائرة مفتوحة.

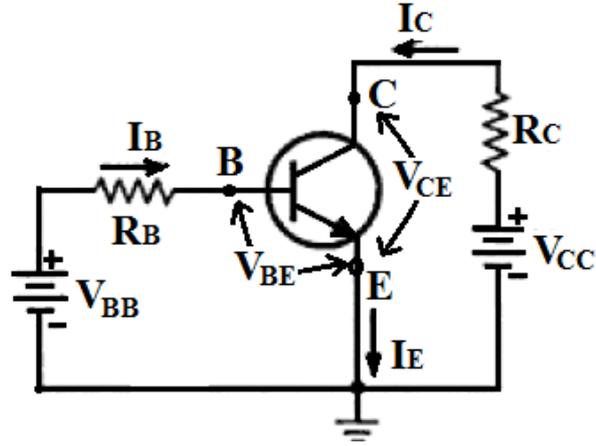
٣- منطقة التشبع (Saturation region): في هذه المنطقة تكون وصلتي الباعث والجامع منحازة امامياً ويتصرف الترانزستور كدائرة مغلقة.



شكل (١٠-٥) منحنيات خواص الإخراج لربط القاعدة المشترك لترانزستور npn

ثانياً: ربط الباعث المشترك Common Emitter Configuration

في هذا النوع من الربط يكون الباعث مشترك بين طرفي الإدخال (القاعدة-الباعث) وطرفي الإخراج (الجامع-الباعث) كما موضح بالشكل (١١-٥) حيث تم استعمال مصدر الجهد V_{BB} لتحيز وصلة الباعث أمامياً والمصدر V_{CC} لتحيز وصلة الجامع عكسياً، اما المقاومتان R_B و R_C فتستعمل لتحديد تيار القاعدة والجامع حسب الترتيب.



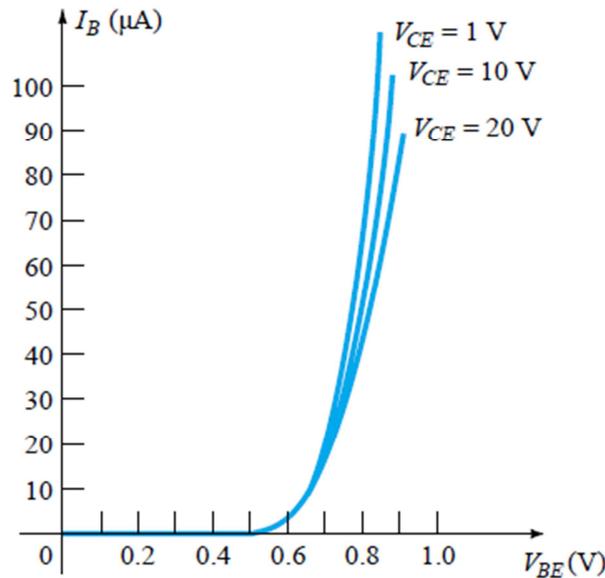
شكل (١١-٥) ربط الباعث المشترك لترانزستور npn

أ- خواص الإدخال لربط الباعث المشترك:

الشكل (١٢-٥) يمثل منحنيات الإدخال لربط الباعث المشترك، حيث نلاحظ:

١- انها تتمثل بعائلة منحنيات تشبه منحنى الخواص للثنائي العادي المنحاز امامياً. وتمثل ممانعة الادخال النسبة بين التغير في فولتية الادخال (ΔV_{BE}) الى التغير في تيار الادخال (ΔI_B) لفولتية معينة V_{CE} ، وعادة ما تكون مقاومة الادخال لربط الباعث المشترك صغيرة (بحدود $1K\Omega$).

٢- لفولتية إدخال (V_{BE}) معينة نلاحظ ان تيار الإدخال (I_B) يقل بزيادة V_{CE} وسبب ذلك انه كلما تزداد V_{CE} فان طبقة استنزاف وصلة (الجامع-القاعدة) تزداد (انحياز عكسي) والذي بدوره يقلل من عرض طبقة استنزاف (الباعث-القاعدة) وبالنتيجة تقل عمليات إعادة الالتحام في منطقة القاعدة مما يقلل من تيار القاعدة (I_B).

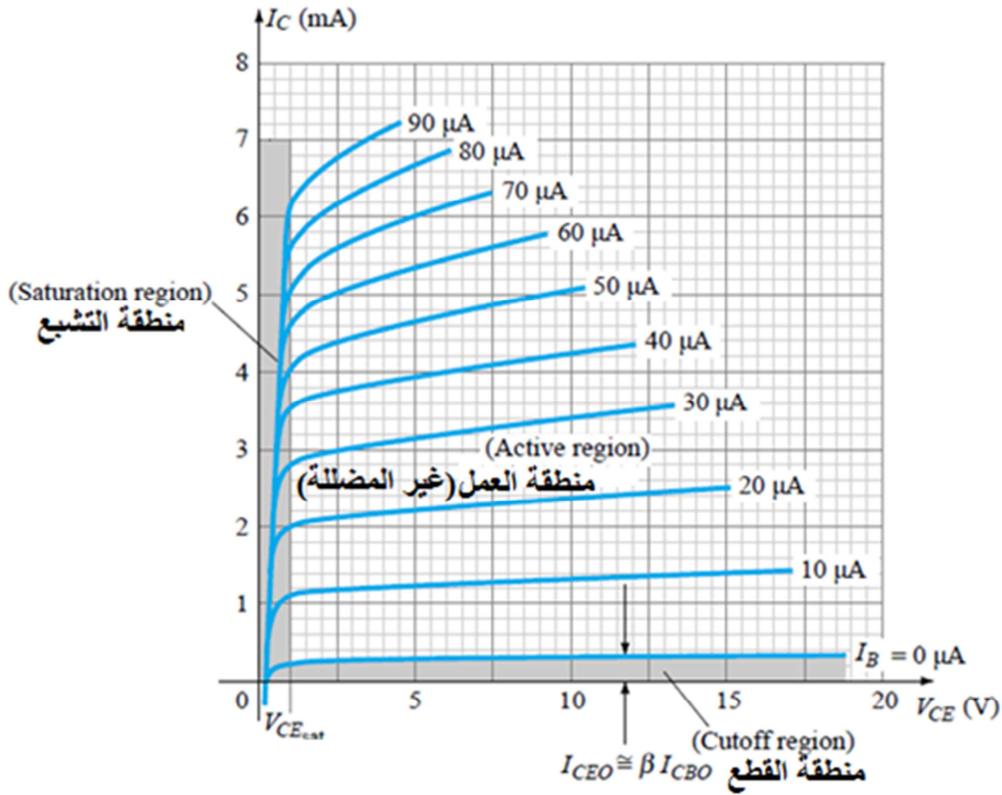


شكل (١٢-٥) منحنيات خواص الإدخال لربط الباعث المشترك لترانزستور npn

ب- خواص الإخراج لربط الباعث المشترك:

الشكل (٥-١٣) يمثل منحنيات خواص الإخراج لربط الباعث المشترك، حيث نلاحظ ما يلي:

- ١- ان هناك سلوك عام يتكرر في كل منحنى لقيمة تيار ادخال (I_B) ، حيث نلاحظ ان هناك زيادة بسيطة في تيار الإخراج (I_C) عند زيادة فولتية الإخراج (V_{CE}) وهذا يدل الى ان مقاومة الإخراج لربط الباعث المشترك عالية (بحدود $50k\Omega$)، ان زيادة الجهد (V_{CE}) يؤدي الى زيادة طبقة استنزاف وصلة الجامع (انحياز عكسي) مما يتيح للجامع جمع المزيد من الكترونات منطقة القاعدة وبالنتيجة يزداد تيار الجامع.
- ٢- عند زيادة تيار القاعدة زيادة بسيطة (بالمايكروامبير μA) فان ذلك يؤدي الى زيادة كبيرة في تيار الجامع (بالملي امبير mA).



شكل (٥-١٢) منحنيات خواص الإخراج لربط الباعث المشترك لترانزستور npn

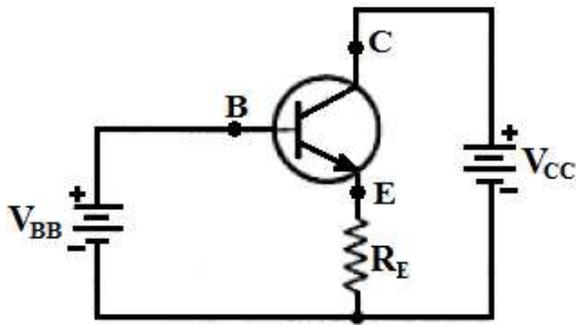
٣- ان منحنى الخواص الإخراج يمكن تقسيمه إلى ثلاث مناطق وهي:

- أ- **منطقة التشبع Saturation region**: حيث يلاحظ انه لفولتيات V_{CE} الاقل من حوالي ($0.2V$) تكون وصلة الجامع منحازة امامياً وكذلك فان وصلة الباعث منحازة امامياً بالأصل، عندها يتصرف الترانزستور كمفتاح مغلق.

ب- **منطقة القطع Cut-off Region**: عندما يكون تيار القاعدة مساوياً للصفر ($I_B=0$) يكون تيار الجامع عبارة عن تيار التشبع العكسي (I_{CEO}) والذي يكون عادة من الصغر بحيث اهماله، لذا تسمى المنطقة الاسفل من ($I_B=0$) بمنطقة القطع ويكون كل من وصلة الباعث والجامع منحازة عكسياً.

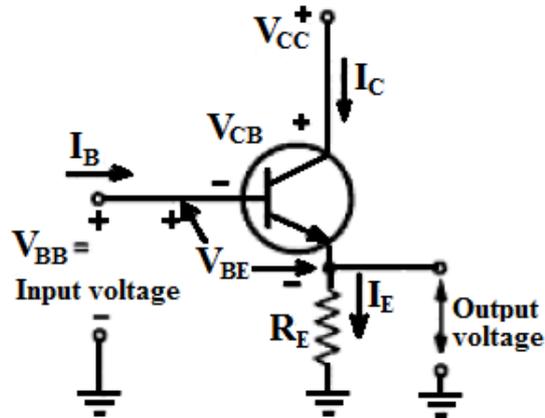
ت- **منطقة العمل (الفعالة) Active region**: في هذه المنطقة تكون وصلة الباعث منحازة امامياً و وصلة الجامع منحازة عكسياً، تمتاز هذه المنطقة بوجود تناسب طردي بين تيار القاعدة (تيار الادخال) وتيار الجامع (تيار الاخراج) حيث لاحظنا ان اي زيادة بسيطة في تيار القاعدة يصاحبه زيادة كبيرة في تيار الاخراج حيث يمكن التعبير عن ذلك بالتناسب بالعلاقة ($I_C=\beta I_B$)، ان هذه الميزة تعني ان الترانزستور العامل في منطقة العمل يمكنه القيام بعملية التكبير، ولهذا يكون لمنطقة العمل اهمية بالغة لانها المنطقة الوحيدة التي يمكن ان يعمل فيها الترانزستور كمكبر.

ثالثاً: ربط الجامع المشترك Common Collector Configuration



في طريقة الربط هذه يكون ادخال الدائرة بين طرفي القاعدة والجامع ويكون طرفي الاخراج بين الباعث و الجامع ، اي ان طرف الجامع يكون مشترك بين طرفي الادخال والايخراج. كما هو موضح بالشكل المجاور.

من المهم ملاحظة ان طرف الجامع غير مؤرض بالنسبة لظروف العمل الساكنة كما كان عليه الحال في الطريقتين السابقتين (القاعدة المشتركة كانت القاعدة مؤرضة وفي الباعث المشترك كان الباعث مؤرض)، اما في حالة ظروف العمل المتناوبة (حيث تقصر مصادر الجهد المستمرة) يتضح جلياً ان طرف الجامع هو الطرف المشترك بين طرفي الادخال والايخراج.



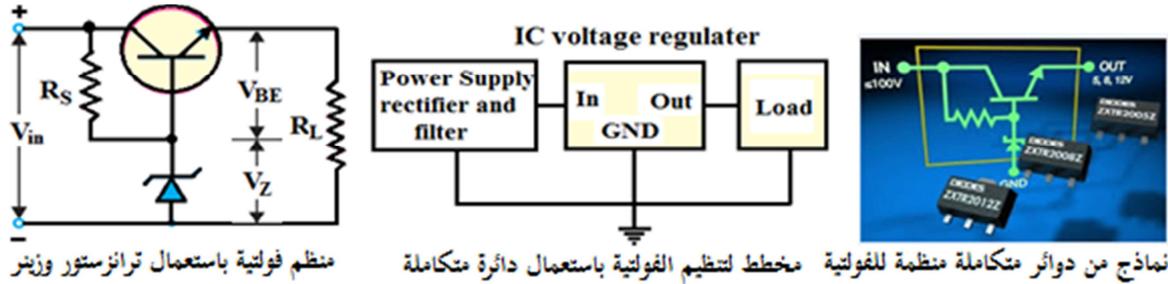
ان ربط الجامع المشترك يشبه ربط الباعث المشترك باستثناء كون مقاومة الحمل مرتبطة بطرف الباعث بدلاً من الجامع، وكون طرفا الاخراج على طرفي تلك المقاومة كما هو موضح بالشكل المجاور.

ان كسب التيار في ربط الجامع المشترك يمثل النسبة بين تيار الجامع الى تيار القاعدة ، ومن ذلك نجد ان ربط الجامع المشترك يتيح كسب تيار عالي يقارب كسب تيار

الباعث المشترك ($I_E \approx I_C$). اما كسب الفولتية فيكون منخفضاً (اقل من واحد).

يمتاز ربط الجامع المشترك كذلك بكون ممانعة الادخال له عالية جداً (بحدود $750K\Omega$) وممانعة اخراج منخفضة جداً (بحدود 50Ω)، ولهذا السبب فغالباً ما يستعمل ربط الجامع المشترك لموائمة الممانعة بين دائرتين (ربط دائرة ذات ممانعة اخراج عالية مع دائرة ذات ممانعة ادخال منخفضة لتحقيق نقل اعظم قدرة ممكنة بين الدائرتين).

وهناك تطبيق مهم آخر لربط الجامع المشترك وهو منظم الفولتية باستعمال ثنائي الزينر والترانزستور الموضح بالشكل التالي، والذي يتميز عن منظم الفولتية الذي يستعمل ثنائي زينر لوحده (الفصل الرابع) هو ان التغيير بتيار يقل بنسبة $(1/\beta)$ وبالتالي فان تأثير ممانعة الزينر يقل بمقدار كبير وتصبح دائرة المنظم اكثر استقراراً وذات قدرة اخراج عالية بالمقارنة مع منظم الزينر. هناك منظمات فولتية تستعمل اكثر من ترانزستور في دوائر اكثر تعقيداً وبإمكانيات افضل. عادة ما تُصنع ثنائيات الزينر والترانزستورات المكونة لمنظم الفولتية على شريحة واحدة على شكل دائرة متكاملة IC (Integrated Circuit) تحتوي على ثلاثة اطراف حيث يكون الادخال الى منظم الفولتية هو الفولتية من جهاز القدرة غير المنظم (مقوم موجة كاملة ومرشح) اما الاخراج فيذهب الى مقاومة الحمل، ان منظم الفولتية الذي يكون بشكل دائرة متكاملة تمتاز بسهولة الاستعمال و الاعتمادية العالية وتنظيم افضل من منظم الزينر أو منظمات الزينر والترانزستور، الجدول (٥-١) يلخص بعض الخصائص لطرق الربط الثلاث.



جدول (٥-١) يوضح مقارنة بين طرق الربط الثلاث لترانزستور npn

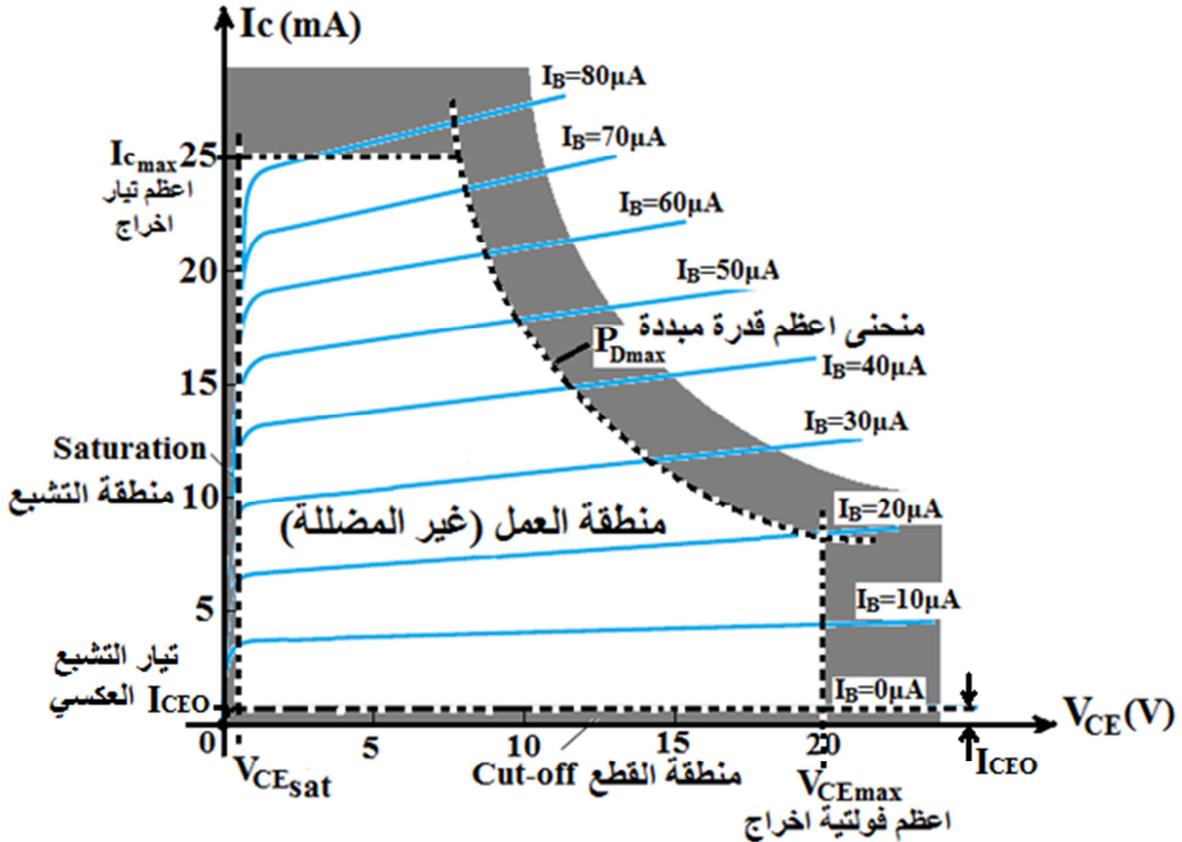
ربط الجامع المشترك	ربط الباعث المشترك	ربط القاعدة المشترك	الخاصية
عالية جداً (بحدود $750K\Omega$)	صغيرة (بحدود $1K\Omega$)	صغيرة جداً (بحدود 100Ω)	ممانعة الادخال
صغيرة جداً (50Ω)	كبيرة (بحدود $50K\Omega$)	عالية جداً ($500K\Omega$)	ممانعة الاخراج
اقل من واحد	عالي (300 او اكثر)	عالي (150 او اكثر)	كسب الفولتية
عالي (بحدود 100 او اكثر)	عالي (بحدود قيمة β)	اقل من واحد	كسب التيار
عالي	عالي جداً	عالي	كسب القدرة
لموائمة الممانعات	للترددات المسموعة	للترددات العالية	التطبيقات

يعتبر ربط الباعث المشترك أكثر طرق الربط استعمالاً في الدوائر الالكترونية للأسباب التالية:

- ١- كسب عالي في التيار.
- ٢- كسب عالي في الجهد والقدرة، فهي الطريقة الوحيدة للربط التي توفر كسب عالي للتيار والجهد وبالتالي تكون افضل طرق الربط من حيث كسب القدرة (كسب القدرة=كسب التيار×كسب الفولتية) ولذلك تكون مكبرات القدرة هي دائماً مكبرات تستعمل ربط الباعث المشترك.
- ٣- تناسب جيد بين ممانعة الاخراج و الادخال (قياساً بطريقتي القاعدة والجامع المشترك) حيث تكون النسبة بين ممانعة الادخال الى ممانعة الاخراج بحدود (50) مما يجعلها مثالية للاستعمال في ربط (اقرن) مراحل الترانزستور المتشابهة مع بعضها البعض.

٦.٥ محددات عمل الترانزستور:

لكل ترانزستور هناك منطقة عمل معينة على منحنى يستطيع العمل ضمنها دون ان تتجاوز التيارات المارة عبره والفولتيات بين اطرافه الحدود القصوى لتحمله او ان يحدث تشوه (Distortion) للإشارة الداخلة المراد تكبيرها. نظراً لكون طريقة ربط الباعث المشترك أكثر طرق الربط استعمالاً فسوف نتناول مناطق عمل ترانزستور الباعث المشترك، الشكل (٥-١٣) يمثل مخطط لمنطقة عمل ترانزستور الباعث المشترك.



شكل (٥-١٣) محددات عمل ترانزستور npn المربوط بطريقة الباعث المشترك

نلاحظ من الشكل (٥-١٣) ان منطقة العمل محددة من جميع الجهات بمحددات وهي:

- ١- منطقة القطع والتي يحددها منحنى ($I_B=0$) والذي يقابله تيار الجامع العكسي (I_{CEO})، ولأي تيار جامع اقل من تلك القيمة يحدث تشويه في الاشارة الخارجة.
- ٢- منطقة القطع والتي تتحدد بفولتية V_{CEsat} وهي الفولتية التي يبدأ عندها ثبوت نسبي في تيار الجامع، وفولتيات اقل من تلك القيمة يحدث تشويه في الاشارة الخارجة عند عمل الترانزستور كمكبر.
- ٣- اقصى قيمة لتيار الجامع يمكن ان يمرره الترانزستور دون ان يتلف (I_{Cmax})، فلكل ترانزستور حد اقصى للتيار يمكن ان يمرره ويعتمد ذلك على مواصفات الترانزستور التي تدون عادة في استمارة المعلومات.
- ٤- اقصى فولتية اخراج يمكن ان يتحملة الترانزستور (V_{CEmax}) دون ان يتلف.
- ٥- منحنى أعظم قدرة مبددة في الترانزستور (P_{Dmax})، حيث ان لكل ترانزستور اقصى قدرة مبددة يمكن ان يتحملها دون ان يتلف، وفي جميع الاحوال يجب ان لا يتجاوز حاصل ضرب ($I_C \times V_{CE}$) قيمة اقصى قدرة وبخلافه يتلف الترانزستور.

يمكن تلخيص الشروط الواجب تحققها لعمل ترانزستور الباعث المشترك في منطقة العمل بالعلاقات

التالية:

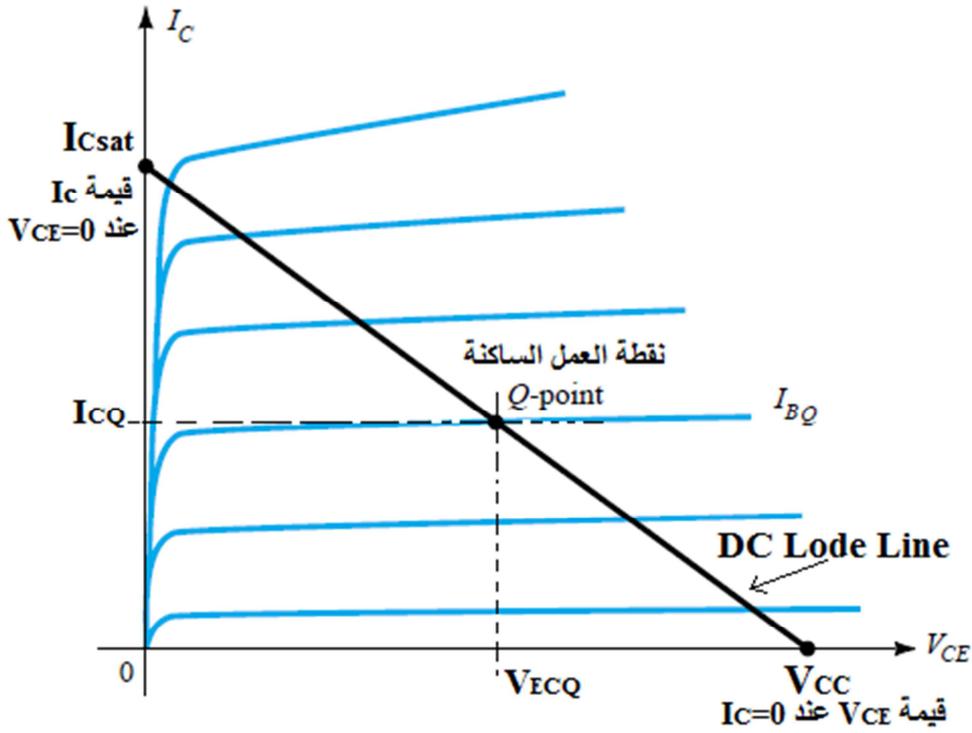
$$I_{CEO} \leq I_C \leq I_{Cmax}$$

$$V_{CEsat} \leq V_{CE} \leq V_{CEmax}$$

$$V_{CE} I_C \leq P_{Dmax}$$

٧.٥ خط الحمل ونقطة العمل وتأثير موقعها على شكل الاشارة

تعتبر طريقة خط الحمل من اهم الطرق الرياضية المتبعة في تحليل دوائر الترانزستور، حيث يمثل خط الحمل المستمر العلاقة بين تيار الاخراج وفولتية الاخراج والتي يتحصل عليها عادة من تطبيق قانون كيرشوف الخاص بفروق الجهد على دائرة الاخراج. وسوف نركز في دراستنا على دائرة الباعث المشترك الموضح بالشكل (٥-١٤). حيث يتم تحديد نقطتي القطع والتشبع من معادلة خط الحمل، اما احداثيات نقطة العمل الساكنة (Q-point) فتحددها قيمة تيار وفولتية الاخراج في ظروف العمل الساكنة (عدم وجود اشارة ادخال). عند استعمال الترانزستور كمكبر يجب ان تكون نقطة العمل في منتصف خط الحمل لتحقيق اكبر تكبير ممكن لإشارة الادخال بدون تشويه.

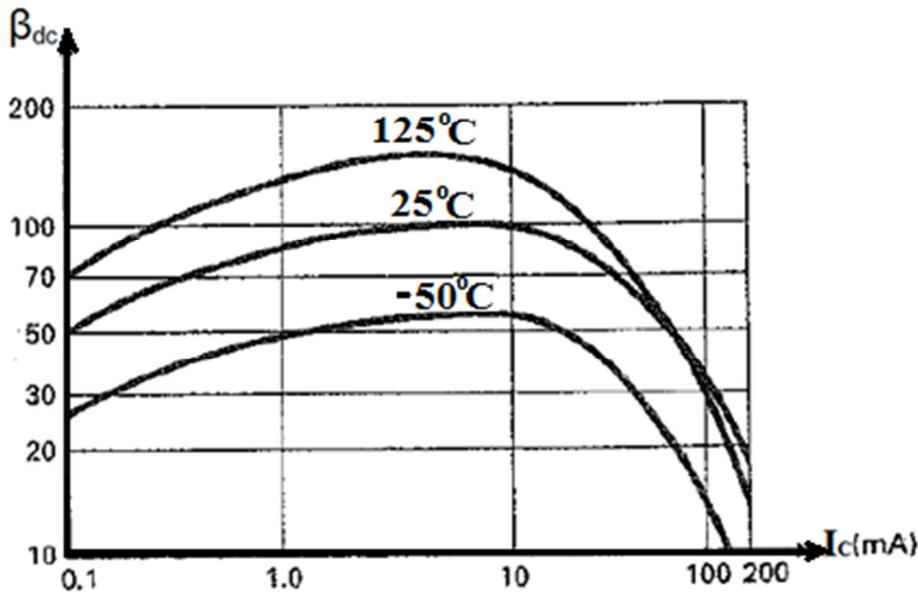


شكل (٥-١٣) خط الحمل لترانزستور الباعث المشترك

٨.٥ تأثير درجة الحرارة واستقرارية العمل للترانزستور:

ان ارتفاع درجة الحرارة تأثير على عمل اشباه الموصلات عموماً، وعلى الترانزستور بشكل خاص، فزيادة درجة الحرارة تقلل من جهد حاجز وصلة الباعث المنحازة امامياً وتزيد من تيار التسرب العكسي لوصلة الجامع المنحازة عكسياً، وبالنتيجة فان عمل الترانزستور يتأثر بشكل كبير بارتفاع درجة الحرارة.

الشكل (٥-١٤) يوضح تأثر عامل كسب التيار المستمر β_{dc} حيث يلاحظ من معامل كسب التيار يزداد بزيادة درجة الحرارة، وكذلك نلاحظ ان معامل كسب التيار يتغير كذلك بتغير تيار الجامع، حيث نلاحظ زيادة تدريجية بمعامل كسب التيار مع زيادة تيار الجامع الى ان يصل الى قيمة عظمى بعدها يبدأ معامل كسب التيار بالانخفاض تدريجياً.



شكل (٥-١٤) تأثير درجة الحرارة على معامل كسب التيار المستمر

عند اخذ تأثير درجة الحرارة فان تيار الجامع سيكون عبارة عن معظم تيار الباعث المحقون المعبر عنه بالمقدار (αI_E) مضافاً اليه تيار حاملات الشحنة الاقلية (الالكترونات في جهة القاعدة P) المتولدة حرارياً في منطقة القاعدة والتي تصل الى الجامع والتي يرمز لها (I_{CBO}) ، اي ان:

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

But we have $I_E = I_C + I_B$

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

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

بترتيب الحدود نحصل على:

عندما يكون طرف القاعدة مفتوحاً $(I_B=0)$ فان تيار الجامع يكون مكوناً من تيار التسرب العكسي

$$I_{CEO} = \frac{I_{CBO}}{1 - \alpha} \Big|_{I_B=0}$$

فقط، بالتعويض عن $(I_B=0)$ في المعادلة الأخيرة نحصل على:

يمكن ايجاد تيار الجامع العكسي بدلالة المعامل β بدلاً عن المعامل α وذلك باستعمال العلاقة (4-5)، ومنه نجد:

$$I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO} \Big|_{I_B=0} \quad (5-6)$$

ان مدى تأثر عمل ترانزستور ما بدرجة الحرارة يُقاس بعامل يسمى معامل الاستقرار الحراري (Stability Factor) والذي يعرف بانه النسبة بين معدل التغير في تيار الجامع الى التغير في تيار التسرب العكسي للجامع بثبوت تيار القاعدة و V_{BE} ، اي ان:

$$S = \left. \frac{\partial I_C}{\partial I_{CEO}} \right|_{I_B, V_{BE} \text{ are constant}} \quad (5-7)$$

وكلما كانت S صغيرة كلما كانت الدائرة اكثر استقرارية.

يمكننا اشتقاق الصيغة الخاصة بعامل الاستقرار الحراري لربط الباعث المشترك كما يلي:

$$I_C = \beta I_B + I_{CEO} \quad \text{لربط الباعث المشترك لدينا:}$$

$$I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO} \quad \text{سبق ان وجدنا :}$$

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CBO} \quad \text{وبالتعويض نحصل على:}$$

$$1 = \beta \frac{\partial I_B}{\partial I_C} + (1 + \beta) \frac{\partial I_{CBO}}{\partial I_C} \quad \text{باشتقاق الطرفين جزئياً بالنسبة لتيار الجامع I_C نحصل على:}$$

$$1 - \beta \frac{\partial I_B}{\partial I_C} = (1 + \beta) \frac{\partial I_{CBO}}{\partial I_C} \quad \text{بترتيب الحدود نحصل على:}$$

$$S = \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} \quad \text{من تعريف عامل الاستقرار الحراري لدينا:}$$

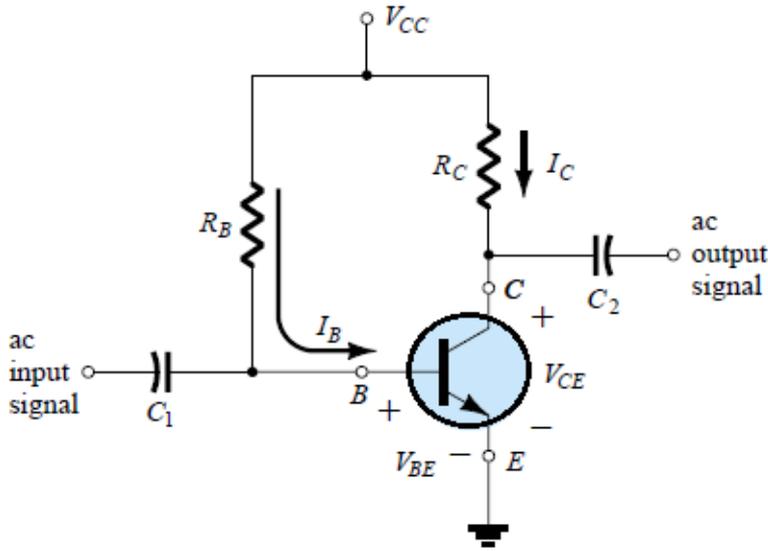
ومنه نجد الصيغة النهائية لعامل الاستقرار الحراري لربط الباعث المشترك:

$$S = \frac{(1 + \beta)}{1 - \beta \frac{\partial I_B}{\partial I_C}} \quad (5-8)$$

٩.٥ دوائر انحياز ترانزستور الباعث المشترك:

ان التطبيقات الخطية (ومن امثلتها دوائر التكبير و المذبذبات) للترانزستور تتطلب ان يكون الترانزستور عاملاً في منطقة العمل، بتعبير آخر ينبغي توفير ظروف العمل المستمر الملائمة لعمل الترانزستور والتي تتطلب ان تكون وصلة الباعث في حالة انحياز امامي ووصلة الجامع في حالة انحياز عكسي، وتسمى الدوائر التي توفر ظروف العمل الساكنة (dc) بدوائر التحيز، وتعتمد كفاءة دائرة الانحياز على موضع نقطة العمل الساكنة والاستقرار موضعها. وهناك عدة انواع من دوائر التحيز، نذكر منها:

أولاً: دائرة الانحياز الثابت Fixed Bias Circuit



تسمى هذه الدائرة أيضاً بدائرة انحياز القاعدة Base Bias، وتعتبر من أبسط دوائر التحيز، الشكل المجاور يمثل دائرة الانحياز الثابت. المقاومتان R_B ، R_C تعملان على توفير فولتيات التحيز المطلوبة، أما المتسعتان C_1 ، C_2 فلن يكون لها دور في ظروف العمل الساكنة (دائرة مفتوحة بالنسبة للفولتية المستمرة).

بتطبيق قانون كيرشوف لفروق الجهد على دائرة الادخال (القاعدة) نحصل على:

$$V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} = 0$$

وبحل المعادلة الأخيرة بالنسبة لتيار القاعدة نحصل على:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad (5-9)$$

المعادلة (5-9) تعطي تيار القاعدة بدلالة كل من $(V_{CC}$ ، V_{BE} ، R_B)

بتطبيق قانون كيرشوف على دائرة الاخراج (الجامع) نحصل على:

$$V_{CC} - I_C R_C - V_{CE} = 0$$

المعادلة الأخيرة تمثل معادلة خط الحمل للانحياز الثابت، وبحل المعادلة بالنسبة لفولتية وصلة الجامع نحصل على:

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

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$

وكذلك يمكننا ان نجد:

$$I_C = \beta I_B$$

لدينا من تعريف عامل كسب التيار المستمر:

من المعادلة (5-9) نلاحظ ان تيار القاعدة ثابت تقريباً حيث ان كل من V_{CC} و R_B هي ثوابت وجهد

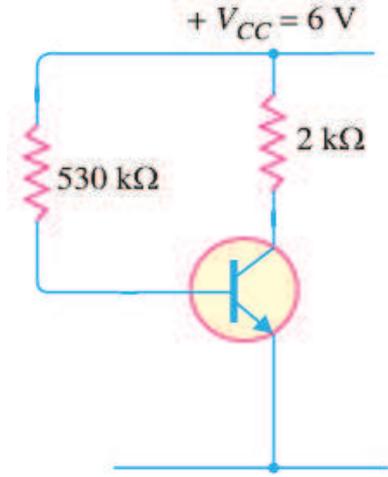
الحاجز لوصلة الباعث V_{BE} يمكن اعتبارها ثابتة تقريباً (لا تعتمد على I_C) عندها يكون: $\frac{\partial I_B}{\partial I_C} = 0$

وبالتعويض في معادلة عامل الاستقرار (5-8) نحصل على:

$$S = 1 + \beta \quad (5-10)$$

من العلاقة الاخيرة نجد ان عامل الاستقرار لدائرة الانحياز الثابت عالية القيمة مما يعني ان دائرة الانحياز الثابت غير مناسبة من ناحية الاستقرار.

تمتاز دائرة الانحياز الثابت بالبساطة في التركيب وسهولة تحديد نقطة العمل الساكنة، كما يمكن التحكم بموضع نقطة العمل من خلال تغيير قيمة المقاومة R_B غير ان عيبها هو استقراريتها الضعيفة. يمكن تحسين استقرارية دائرة الانحياز الثابت بإضافة مقاومة على التوالي مع طرف الباعث مما يقلل من عامل الاستقرارية للدائرة (تزداد الاستقرارية) غير ان ذلك يكون على حساب كسب الفولتية الكلي للدائرة.



مثال (٥-١): في الشكل المجاور، الترانزستور مصنوع من السليكون وله $(\beta=100)$ ، ارسم خط الحمل المستمر للدائرة ثم حدد موضع نقطة العمل الساكنة، وهل ان موضعها مناسب، ثم اوجد عامل الاستقرارية وهل هو مناسب.

الحل:

نلاحظ ان دائرة الانحياز المستعملة هي دائرة الانحياز الثابت، ولدينا من معطيات المسألة:

$$V_{CC}=6V, R_B=530k\Omega, R_C=2k\Omega, \beta=100, V_{BE}=0.7V$$

لرسم خط الحمل نجد اولاً معادلة خط الحمل، في حالة الانحياز الثابت معادلة خط الحمل هي:

$$V_{CC} - I_C R_C - V_{CE} = 0$$

لرسم خط الحمل نجد نقطتي التقاطع مع المحاور والتي تتمثل بنقطتي التشبع والقطع وكما يلي:

نجد اولاً احداثيات نقطة القطع $(I_C=0)$ وبالتعويض عن تيار الجامع نحصل على:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C, \quad I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} = 6V$$

ومنه نجد ان احداثي نقطة القطع هي $(6V, 0)$

ولإيجاد احداثي نقطة التشبع نعوض عن $(V_{CE}=0)$ في معادلة خط الحمل ومنه نجد:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}, \quad V_{CE} = 0 \Rightarrow I_{C_{sat}} = \frac{V_{CC}}{R_C} \Rightarrow I_{C_{sat}} = \frac{6}{2 \times 10^3} = 3 \times 10^{-3} A$$

ومنه نجد ان احداثي نقطة التشبع هي $(0, 3mA)$

باختيار مقياس رسم مناسب يمكننا الآن رسم خط الحمل المستمر وذلك بتحديد موضع كل من نقطة القطع على محور V_{CE} ونقطة التشبع على محور I_C وكما هو موضح في الشكل التالي.

لتحديد موضع نقطة العمل الساكنة على خط الحمل نجد أولاً احداثي نقطة العمل (V_{CEQ}, I_{CQ}) ، والتي تمثل قيم V_{CE} و I_C في الدائرة. نجد أولاً تيار الجامع ومن ثم نعوض عن قيمته في معادلة خط الحمل لإيجاد V_{CEQ} .

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad \text{في دائرة الانحياز الثابت يعطى تيار القاعدة بالعلاقة:}$$

$$I_{BQ} = \frac{6 - 0.7}{530 \times 10^3} = 10^{-5} \text{ A} \quad \text{وبالتعويض عن القيم نجد:}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} \Rightarrow I_{CQ} = 100 \times 10^{-5} = 10^{-3} \text{ A}$$

ولإيجاد قيمة V_{CEQ} نعوض عن قيمة I_{CQ} في معادلة خط الحمل، فتحصل على:

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C$$

$$V_{CEQ} = 6 - (10^{-3} \times 2 \times 10^3) \Rightarrow V_{CEQ} = 4 \text{ V}$$

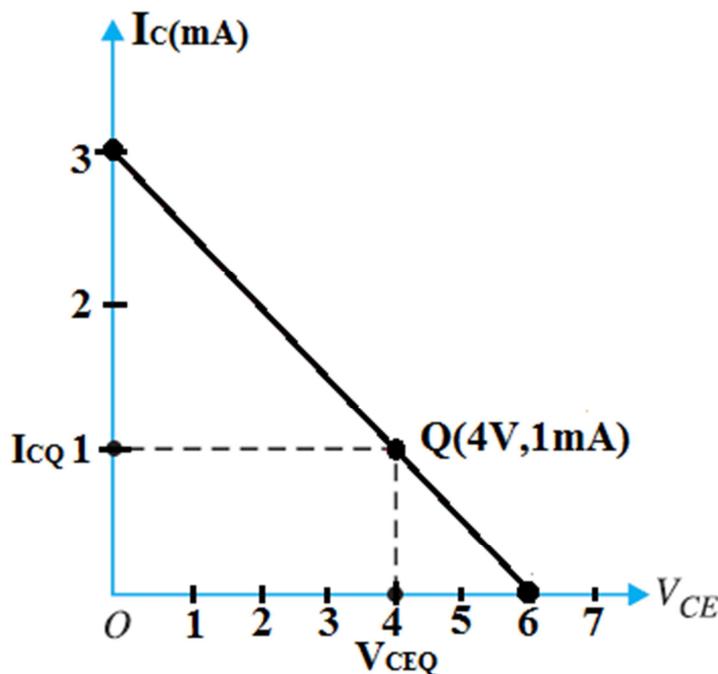
ومن ذلك نجد ان احداثي نقطة العمل الساكنة هي $(4 \text{ V}, 1 \text{ mA})$ ، ثم نحدد موضعها على خط الحمل كما موضح برسمة خط الحمل. حيث نلاحظ ان نقطة العمل لا تقع في منتصف خط الحمل اذ نجدها اقرب لنقطة القطع اي ان موضعها غير مناسب لاغراض تكبير الإشارة. بالنسبة لعامل الاستقرار، بما ان الدائرة هي دائرة الانحياز الثابت فان عامل الاستقرار يعطى بالعلاقة:

$$S = 1 + \beta$$

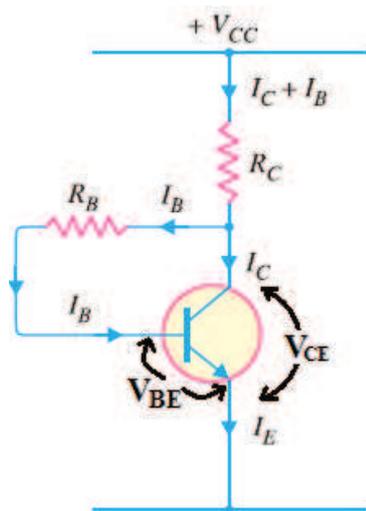
$$S = 1 + 100 = 101$$

وبالتعويض عن قيمة معامل كسب التيار نجد:

نلاحظ ان قيمة عامل الاستقرار مرتفع مما يدل ان الدائرة ضعيفة الاستقرار.



ثانياً: دائرة الانحياز الذاتي Self-Biasing Circuit



تسمى هذه الدائرة ايضاً انحياز التغذية الخلفية Feedback biasing ، تختلف دائرة الانحياز الذاتي عن دائرة الانحياز الثابت ، يكون طرف مقاومة القاعدة R_B مرتبط بطرف الجامع بدلاً من فولتية التحيز V_{CC} كما هو موضح بالشكل المجاور. وهذا الترتيب يتيح ارجاع جزء من فولتية الاخراج الى ادخال الدائرة عبر المقاومة R_B وهو ما يطلق عليه بالتغذية الخلفية.

ان التغذية الخلفية عبر المقاومة R_B تعمل على زيادة استقرارية الدائرة وجعل موضع نقطة العمل مستقرة، فعند زيادة درجة الحرارة فان ذلك يؤدي الى زيادة معامل كسب التيار β_{dc} وهذا بدوره يؤدي الى زيادة تيار الجامع ($I_C = \beta I_B$)، وهذا بدوره يؤدي الى زيادة فرق الجهد عبر مقاومة الجامع ($I_C R_C$) وهذه الزيادة تكون على حساب جهد عند مفترق الجامع ($V_{CC} = I_C R_C + V_{CE}$) والذي بدوره يقلل من فرق الجهد على طرفي مقاومة القاعدة ($V_B = V_{CE} - V_{BE}$) ونقصان الجهد عبر مقاومة القاعدة يؤدي الى التقليل من تيار القاعدة ($I_B = V_B / R_B$) وهذا بدوره يؤدي الى التقليل من تيار الجامع ($I_C = \beta I_B$)، وخلاصة الامر ان التغذية الخلفية تعمل على التقليل من تيار القاعدة عند زيادة معامل الكسب مما يبقي على حاصل ضربهما (تيار الاخراج I_C) ثابتاً تقريباً.

لإيجاد معادلة خط الحمل لدائرة الانحياز الذاتي نطبق قانون كيرشوف الخاص بفرق الجهد على دائرة

$$V_{CC} - I_E R_C - V_{CE} = 0 \quad \text{الجامع فنحصل على:}$$

من قانون كيرشوف الخاص بالتيار لدينا ($I_E = I_C + I_B$) وبالتعويض في معادلة خط الحمل نحصل على:

$$V_{CC} - (I_C + I_B)R_C - V_{CE} = 0$$

المعادلة الاخيرة تمثل معادلة خط الحمل للانحياز الذاتي، ومنها نجد:

$$V_{CE} = V_{CC} - (I_C + I_B)R_C$$

لايجاد تيار القاعدة نطبق قانون كيرشوف لفرق الجهد على دائرة القاعدة، فنحصل على:

$$V_{CC} - (I_C + I_B)R_C - I_B R_B - V_{BE} = 0$$

بترتيب الحدود نحصل على:

$$(R_B + R_C)I_B = V_{CC} - V_{BE} - I_C R_C \quad (5-11)$$

من المعادلة (5-11) يمكننا إيجاد تيار القاعدة بدلالة تيار الجامع، حيث نجد:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE} - I_C R_C}{R_B + R_C} \quad (5-12)$$

المعادلة (5-12) سيكون لها استعمال عند إيجاد عامل الاستقرارية للدائرة.

بالعودة الى المعادلة (5-11) يمكننا حل المعادلة باستعمال العلاقة $(I_C = \beta I_B)$ ، فنحصل على:

$$(R_B + R_C)I_B = V_{CC} - V_{BE} - \beta I_B R_C$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_C} \quad \text{بترتيب الحدود نحصل على:}$$

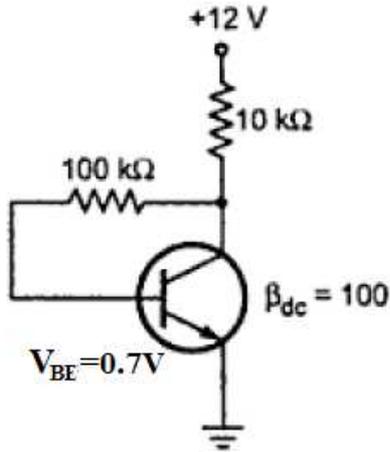
بعد إيجاد تيار القاعدة يمكننا إيجاد تيار الجامع باستعمال العلاقة $(I_C = \beta I_B)$.

من المعادلة (5-11) يمكننا إيجاد عامل الاستقرار للانحياز الذاتي، فمن تعريف عامل الاستقرار لدينا:

$$S = \frac{(1 + \beta)}{1 - \beta \frac{\partial I_B}{\partial I_C}}, \quad \frac{\partial I_B}{\partial I_C} = -\frac{R_C}{R_B + R_C}$$

$$S = \frac{(1 + \beta)}{1 + \beta \frac{R_C}{R_B + R_C}}$$

ومنه نجد الصيغة النهائية لعامل الاستقرارية لدائرة الانحياز الذاتي:



مثال (5-2):

أوجد احداثيات نقطة العمل الساكنة وعامل الاستقرارية للدائرة الموضحة بالشكل المجاور.

الحل:

نلاحظ ان الدائرة هي دائرة الانحياز الذاتي وفيها:

$$V_{CC} = 12V, \quad R_C = 10K\Omega, \quad R_E = 100K\Omega, \quad V_{BE} = 0.7V, \quad \beta = 100$$

لإيجاد احداثيات نقطة العمل الساكنة نجد أولاً تيار القاعدة باستعمال العلاقة:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_C}$$

بالتعويض عن القيم نحصل على:

$$I_B = 10.18 \times 10^{-6} \text{ A}$$

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 10.18 \times 10^{-6}$$

ولإيجاد تيار الجامع نستعمل العلاقة:

$$I_C = 1.018 \times 10^{-3} \text{ A}$$

ومنه نجد:

ولإيجاد V_{CE} نعوض عن تيار القاعدة والجامع في معادلة خط الحمل لدائرة الانحياز الذاتي:

$$V_{CE} = V_{CC} - (I_C + I_B)R_C$$

$$V_{CE} = 12 - (1.018 \times 10^{-3} + 10.18 \times 10^{-6}) \times 10 \times 10^3$$

$$V_{CE} = 1.72 \text{ V}$$

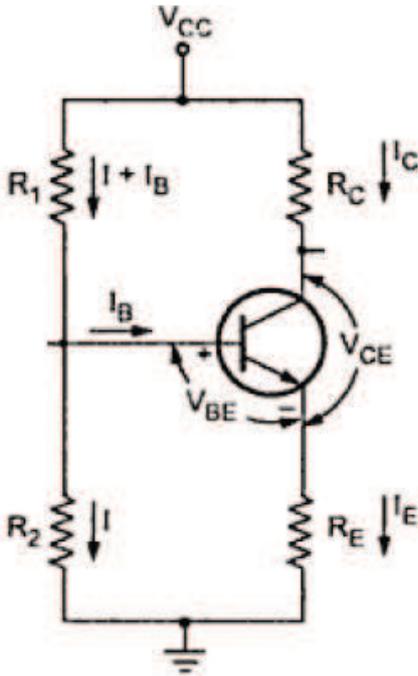
أحداثي نقطة العمل الساكنة هي (1.72V, 1.018mA)

لإيجاد عامل الاستقرار الحراري نستعمل العلاقة الخاصة بعامل الاستقرار لدائرة الانحياز الذاتي:

$$S = \frac{(1+\beta)}{1+\beta \frac{R_C}{R_B + R_C}} = \frac{1+100}{1+100 \left(\frac{10 \times 10^3}{100 \times 10^3 + 10 \times 10^3} \right)} = \frac{101}{1+9.091}$$

$$S = 10.01$$

نلاحظ من هذه النتيجة ان استقرار هذه الدائرة افضل من سابقتها في المثال السابق.



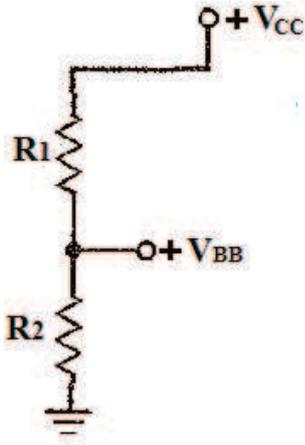
ثالثاً: دائرة انحياز مقسم الجهد Voltage Divider Bias

تعتبر دائرة انحياز مقسم الجهد من اكثر دوائر التحيز استعمالاً في التطبيقات العملية وذلك لما تمتاز به من استقرارية عمل عالية وذلك بالمقارنة مع دوائر التحيز التي سبق شرحها.

الشكل المجاور يوضح دائرة انحياز مقسم الفولتية، حيث تعمل المقاومتان R_1 و R_2 كمجزئ جهد لتوفير فولتية التحيز المطلوبة لوصلة الباعث والجامع، ولهذا سميت هذه الدائرة بانحياز مقسم الجهد. بينما المقاومة R_E فتعمل على تحسين استقرارية الدائرة.

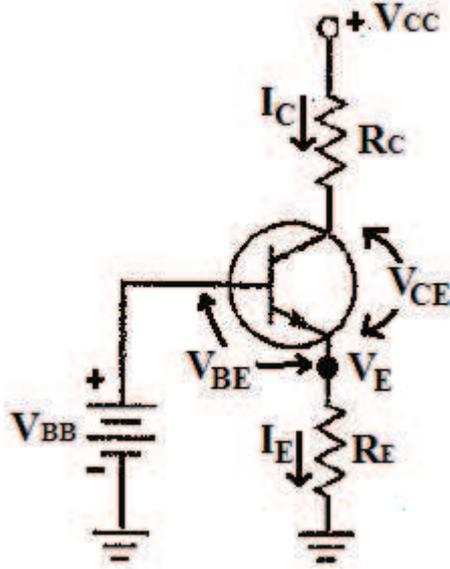
هناك طريقتان لتحليل دائرة انحياز مقسم الجهد، احدها طريقة تقريبية (Approximate Analysis) تصلح في حالة معينة، والثانية دقيقة (Exact Analysis) وتصلح في كل الحالات.

١- الطريقة التقريبية:



في هذه الطريقة يتم اهمال تيار القاعدة بالمقارنة مع التيار المار في المقاومتين R_1 و R_2 كما هو موضح بالشكل المجاور، عندها يمكن ايجاد جهد مفرق القاعدة بالاستفادة من قانون مقسم الجهد:

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$



عندها يمكن تبسيط دائرة انحياز مقسم الجهد الى الدائرة الموضحة بالشكل المجاور. بتطبيق قانون كيرشوف الخاص بفروق الجهد على حلقة المصدر V_{BB} ووصلة الباعث نحصل على:

$$V_{BB} - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E}, \quad I_C \approx I_E$$

بتطبيق قانون كيرشوف الخاص بفروق الجهد على دائرة

الايخراج نحصل على:

$$V_{CC} - I_C R_C - V_{CE} - I_E R_E = 0, \quad I_E \approx I_C$$

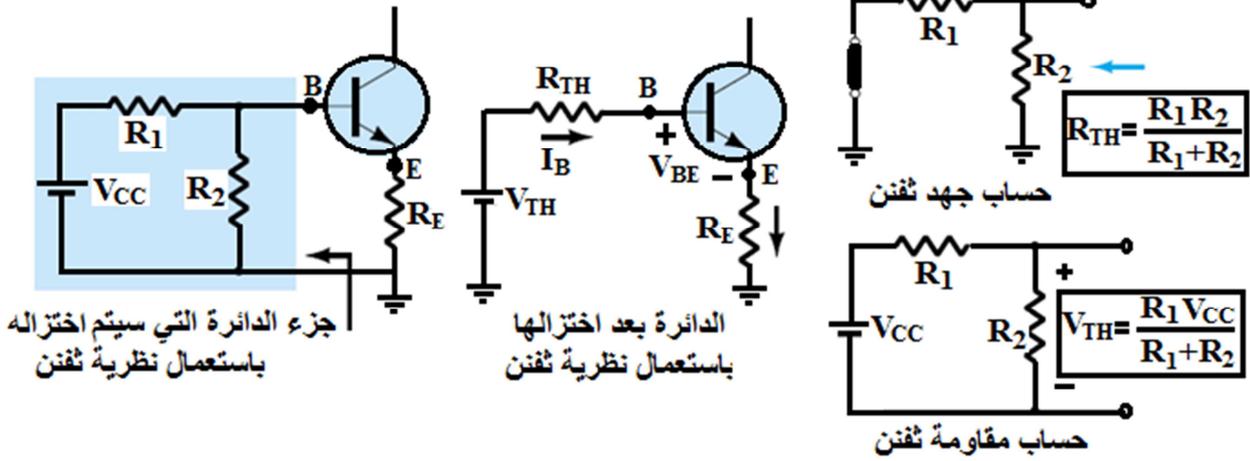
$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_C$$

وهنا يجب الانتباه ان الطريقة التقريبية تصح فقط في حالة

تحقق الشرط ($\beta R_E \geq 10 R_2$) وبخلافه لا يجوز استعمال هذا التقريب.

٢- الطريقة الدقيقة:

في هذه الطريقة لا يهمل تيار القاعدة، ويتم اختزال الدائرة التي تقع الى يسار القاعدة بالاستفادة من نظرية ثفنن (يمكن اختزال اي دائرة كهربائية ذات طرفين الى دائرة مكافئة مكونة من مقاومة وبطارية، قيمة تلك المقاومة تساوي المقاومة المكافئة بين الطرفين بعد قصر مصادر الجهد، اما قيمة جهد البطارية فيساوي فرق الجهد بين الطرفين)، الشكل التالي يوضح مراحل اختزال الدائرة وكيفية حساب مقاومة ثفنن وجهد ثفنن.



بتطبيق قانون كيرشوف الخاص بفروق الجهد على دائرة الادخال التي تم اختزالها بواسطة نظرية ثفنن نحصل على:

$$V_{TH} - I_B R_{TH} - V_{BE} - I_E R_E = 0, \quad I_E = I_C + I_B$$

$$V_{TH} - I_B R_{TH} - V_{BE} - (I_C + I_B) R_E = 0 \dots\dots\dots(1), \quad I_C = \beta I_B$$

$$R_{TH} I_B + (\beta + 1) R_E I_B = V_{TH} - V_{BE}$$

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + (\beta + 1) R_E}$$

ومنه نحصل على الصيغة الرياضية الخاصة بتيار القاعدة:

وبعد ايجاد تيار القاعدة يمكننا ايجاد تيار الجامع باستعمال العلاقة ($I_C = \beta I_B$), ولإيجاد معادلة خط الحمل نطبق قانون كيرشوف الخاص بفروق الجهد على دائرة الاخراج فنحصل على:

$$V_{CC} - I_C R_C - V_{CE} - I_E R_E = 0, \quad I_E \approx I_C$$

$$(R_C + R_E) I_C = V_{CC} - V_{CE}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_C$$

المعادلة الاخيرة تمثل معادلة خط الحمل للانحياز مقسم الجهد. ومنه نستطيع ان نجد احداثي نقطة

$$\text{القطع } (V_{CC}, 0) \text{ واحداثي نقطة التشبع } (0, \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}).$$

ولإيجاد عامل الاستقرار الحراري لدائرة انحياز مقسم الجهد سبق ان وجدنا:

$$V_{TH} - I_B R_{TH} - V_{BE} - (I_C + I_B) R_E = 0$$

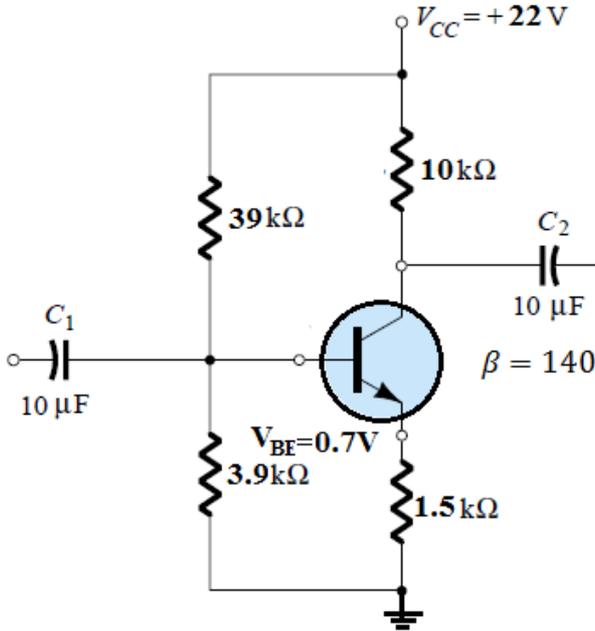
$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE} - I_C R_E}{R_{TH} + R_E}$$

من تعريف عامل الاستقرار لربط الباعث المشترك لدينا:

$$S = \frac{(1+\beta)}{1-\beta} \frac{\partial I_B}{\partial I_C}, \quad \frac{\partial I_B}{\partial I_C} = -\frac{R_E}{R_{TH} + R_E}$$

$$S = \frac{(1+\beta)}{1+\beta \frac{R_E}{R_{TH} + R_E}}$$

ومنه نجد الصيغة النهائية لعامل الاستقرار انحياز مقسم الجهد:



مثال (٥-٣): في الشكل المجاور :

١- اوجد V_{CE} و I_C باعتماد الطريقة الدقيقة.

٢- اوجد عامل الاستقرار للدائرة.

٣- ارسم خط الحمل المستمر ثم حدد موضع نقطة العمل عليه وهل هو مناسب.

٤- اوجد V_{CE} و I_C باعتماد الطريقة التقريبية.

الحل: من معطيات المسألة لدينا:

$$V_{CC} = 22V, R_1 = 39k\Omega, R_2 = 3.9k\Omega, R_C = 10k\Omega, R_E = 1.5k\Omega, \beta = 140, V_{BE} = 0.7V$$

نلاحظ ان الدائرة في انحياز مقسم جهد، ولإيجاد I_C علينا ان نجد I_B باستعمال العلاقة:

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + (\beta + 1)R_E}$$

$$V_{TH} = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2} = \frac{3.9 \times 10^3 \times 22}{39 \times 10^3 + 3.9 \times 10^3} \Rightarrow V_{TH} = 2V$$

$$R_{TH} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{39 \times 10^3 \times 3.9 \times 10^3}{39 \times 10^3 + 3.9 \times 10^3} \Rightarrow R_{TH} = 3.55 \times 10^3 \Omega$$

بالتعويض في معادلة تيار القاعدة نحصل على:

$$I_B = \frac{2 - 0.7}{3.55 \times 10^3 + (140 + 1) \times 1.5 \times 10^3} \Rightarrow I_B = 6.05 \times 10^{-6} A$$

$$I_C = \beta I_B = 140 \times 6.05 \times 10^{-6} \Rightarrow I_C = 8.5 \times 10^{-4} A$$

من معادلة خط الحمل لدينا:

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C$$

$$V_{CE} = 22 - (10 \times 10^3 + 1.5 \times 10^3) \times 8.5 \times 10^{-4} \Rightarrow V_{CE} = 12.22V$$

لرسم خط الحمل علينا أولاً أن نجد نقطتي التشبع والقطع.

نجد أولاً احداثيات نقطة القطع $(V_{CC}, 0)$ وبالتعويض نجد ان احداثيات نقطة القطع هي $(22V, 0)$ ،

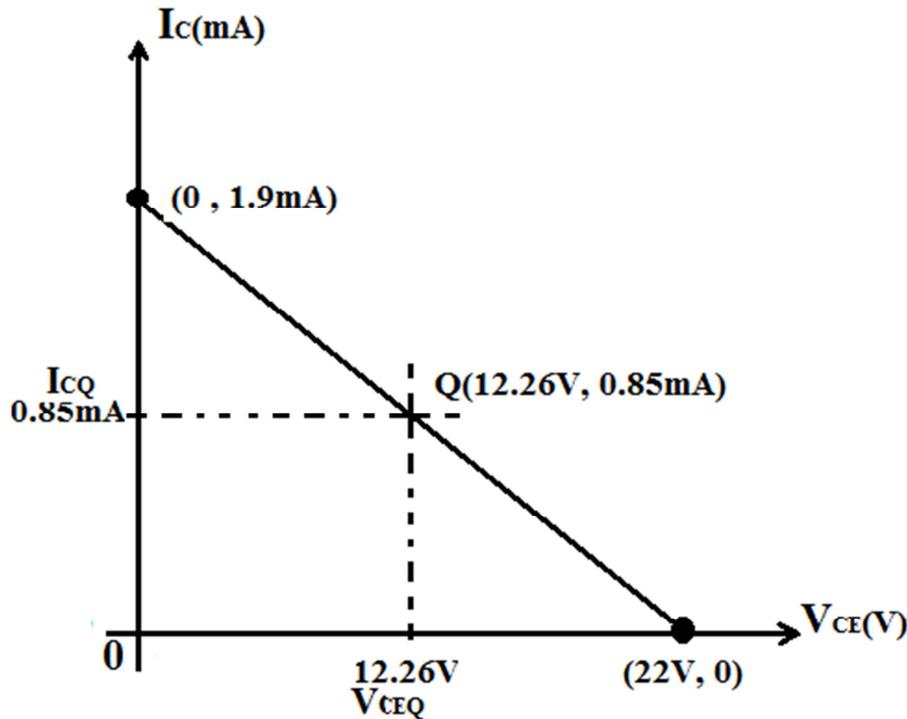
ومن ثم نجد احداثيات نقطة التشبع

$$I_{CSat} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} = \frac{22}{39 \times 10^3 + 3.9 \times 10^3}$$

$$I_{CSat} = 1.913mA$$

ومنه نجد ان احداثيات نقطة التشبع هي $(0, 1.913mA)$ ومنه نستطيع رسم خط الحمل المستمر كما

هو موضح بالشكل التالي:



نلاحظ من موقع نقطة العمل الساكنة انها قريبة من منتصف خط الحمل لذا يعتبر موقعها ملائم.

لإيجاد قيمة عامل الاستقرار الحراري نستعمل العلاقة الخاصة بعامل الاستقرار الحراري لانحياز مقسم

الجهد:

$$S = \frac{(1+\beta)}{1+\beta \frac{R_E}{R_{TH} + R_E}} = \frac{1+140}{1+140 \left(\frac{1.5}{3.55+1.5} \right)} = \frac{141}{1+41.584} \Rightarrow S = 3.3$$

لإعادة حل المسألة بالطريقة التقريبية يجب علينا أولاً التحقق من الشرط الذي يسمح باستخدام الطريقة التقريبية وهو $(\beta R_E \geq 10R_2)$ ، وكما يلي:

$$\beta R_E \geq 10R_2$$

$$140 \times 1.5 \times 10^3 \geq 10 \times 3.9 \times 10^3$$

$$210000 \geq 39000$$

من النتيجة نلاحظ ان العلاقة متحققة وبالتالي يجوز استعمال التقريب:

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{3.9 \times 10^3 \times 22}{39 \times 10^3 + 3.9 \times 10^3}$$

$$V_{BB} = 2V$$

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E}$$

$$I_{CQ} \approx I_E = \frac{2 - 0.7}{1.5 \times 10^3} = 0.867 \text{mA}$$

وهي نتيجة قريبة من القيمة الدقيقة (0.85mA)

ولإيجاد قيمة V_{CEQ} نستعمل العلاقة:

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C$$

$$V_{CEQ} = 22 - (10 \times 10^3 + 1.5 \times 10^3) \times 0.867 \times 10^{-3}$$

$$V_{CEQ} = 12.03V$$

وهي نتيجة قريبة من القيمة الدقيقة (12.22V).

عموماً يجب التحقق من الشرط قبل استعمال المعادلات الخاصة بالطريقة التقريبية.

الجدول (٥-٢) يلخص العلاقات الخاصة بدوائر الانحياز. ان خطوات حل أية مسألة من مسائل دوائر

الانحياز يمكن إجمالها بالخطوات التالية:

١- تحديد نوع دائرة الانحياز (لمعرفة اي العلاقات التي تستعمل في الحل)، وكتابة معطيات المسألة.

٢- إيجاد تيار القاعدة (I_B) باستعمال العلاقة الخاصة بدائرة الانحياز.

٣- إيجاد تيار الجامع باستعمال العلاقة ($I_C = \beta I_B$).

٤- التعويض عن تيار الجامع في معادلة خط الحمل لإيجاد V_{CE} .

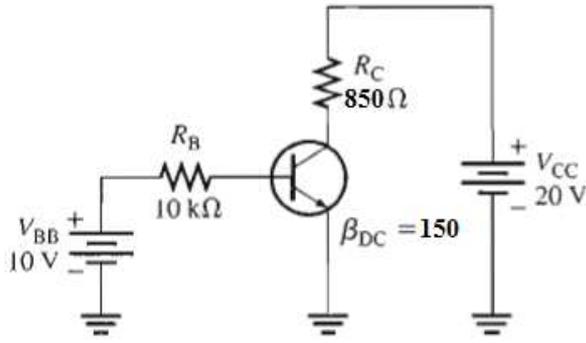
- ٥- لرسم خط الحمل نجد احداثيات نقطتي القطع والتشبع الخاصة بدائرة الانحياز ونختار مقياس رسم مناسب لمحوري V_{CE} و I_C ، ونحدد موضع النقطتين على المحاور ثم نصل بينهما.
- ٦- لتحديد موضع نقطة العمل نحدد موضع I_C و V_{CE} التي حسبناها على المحاور ثم نرسم أعمدة على المحاور من النقطتين ونقطة تقاطعهما يكون على خط الحمل. واذا كانت في المنتصف فالتصميم جيد.
- ٧- نجد عامل الاستقرار للدائرة باستعمال القانون الخاص بعامل الاستقرار للدائرة.

جدول (٥-٢) مقارنة بين دوائر انحياز

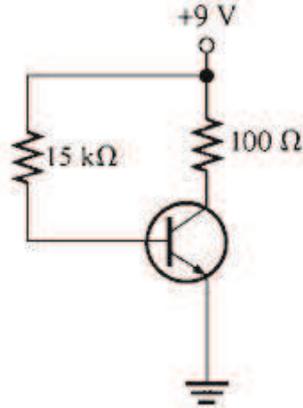
انحياز مقسم الجهد	الانحياز الذاتي (التغذية الخلفية)	الانحياز الثابت (انحياز القاعدة)
$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + (\beta + 1)R_E}$ $V_{TH} = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2}, \quad R_{TH} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$	$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_C}$	$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$
$I_C = \beta I_B$	$I_C = \beta I_B$	$I_C = \beta I_B$
$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C$	$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$	$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$
$(V_{CC}, 0), \quad (0, \frac{V_{CC}}{R_C + R_E})$	$(V_{CC}, 0), \quad (0, \frac{V_{CC}}{R_C})$	$(V_{CC}, 0), \quad (0, \frac{V_{CC}}{R_C})$
$S = \frac{(1 + \beta)}{1 + \beta \frac{R_E}{R_{TH} + R_E}}$	$S = \frac{(1 + \beta)}{1 + \beta \frac{R_C}{R_B + R_C}}$	$S = 1 + \beta$

أسئلة الفصل الخامس

- س ١: اشرح انواع انحياز الترانزستور ثم حدد ايها اكثر استعمالاً ولماذا؟
- س ٢: اشرح مع الرسم خواص الادخال والاخراج لربط الباعث المشترك.
- س ٣: لترانزستور الباعث المشترك، وضح المقصود بمنطقة العمل ثم ارسمها مع التأشير.
- س ٤: وضح المقصود بالمعامل β_{dc} والمعامل α_{dc} ثم اشتق العلاقة التي تربط بينهما.
- س ٥: قارن بين طرق ربط الترانزستور ثم بين ايها اكثر استعمالاً ولماذا؟
- س ٦: وضح المقصود بعامل الاستقرار الحراري ثم اشتق العلاقة الخاصة به لربط الباعث المشترك.
- س ٧: لترانزستور ما تيار القاعدة $(30\mu A)$ وتيار الباعث $(7.2mA)$ ، احسب كل من المعامل α_{dc} و β_{dc} .

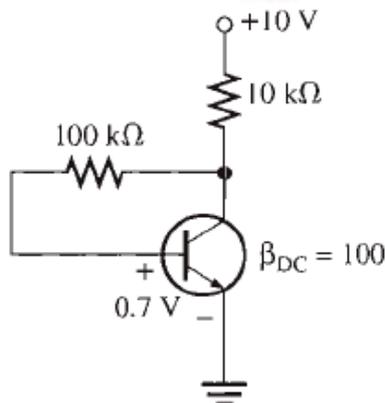


- س ٨: في الشكل المجاور، اشتق الصيغة الخاصة بحساب كل من تيار القاعدة، تيار الجامع، V_{CE} ، ثم استعمل تلك العلاقات في ايجاد قيم كل من V_{CE} ، I_C ، I_B .



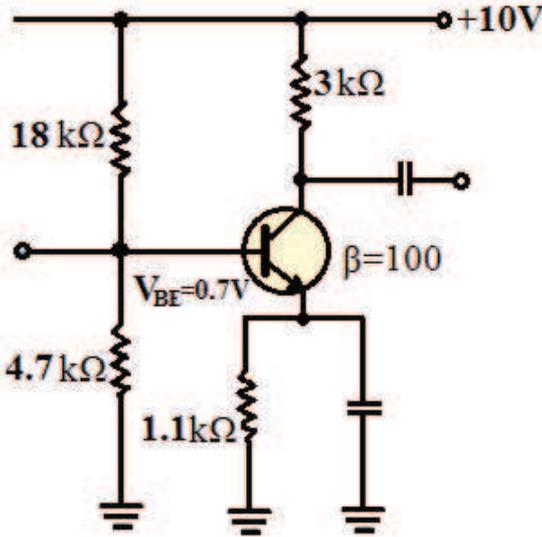
س ٩

- اوجد احداثيات نقطة العمل الساكنة وعامل الاستقرارية للدائرة الموضحة بالشكل المجاور، علماً بان الترانزستور مصنوع من السليكون وله $(\beta=150)$.



س ١٠

- اوجد احداثيات نقطة العمل الساكنة وعامل الاستقرارية للدائرة الموضحة بالشكل المجاور.

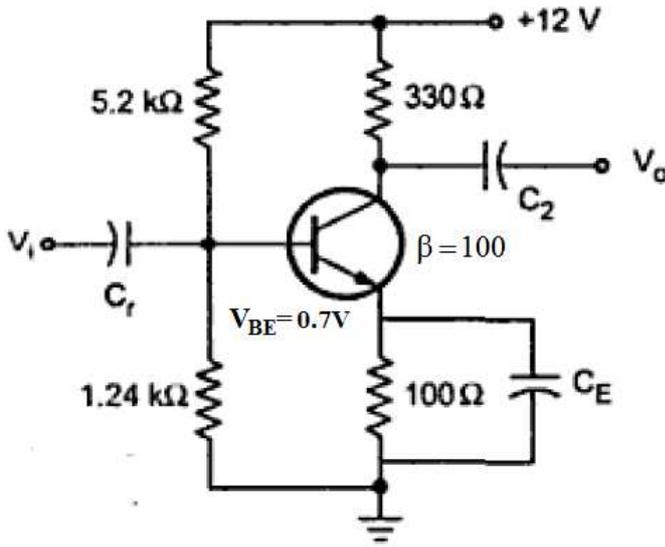


س١١: في الشكل المجاور :

أ- اوجد V_{CE} و I_C .

ب- اوجد عامل الاستقرار للدائرة.

ج- ارسم خط الحمل المستمر ثم حدد موضع نقطة العمل عليه وهل هو مناسب.



س١٢: في الشكل المجاور:

أ- اوجد V_{CE} و I_C .

ب- اوجد عامل الاستقرار للدائرة.

ج- ارسم خط الحمل المستمر ثم حدد موضع نقطة العمل عليه وهل هو مناسب.

س١٣: الشكل التالي يوضح مكبر باعث مشترك ذي ثلاث مراحل، فاذا علمت ان الترانزستورات الثلاث مصنوعة من السليكون، اوجد:

أ- احداثيات نقطة العمل الساكنة لكل مرحلة .

ب- معامل الاستقرار الحراري لكل مرحلة.

