كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الثالثة

المادة : الكترونيات2

المحاضرة:الاولى/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

الترانزستور ثنائي القطبية Bioplar Junction Transistor

يعتبر الترانزستور ثنائي القطبية أو الوصلة Junction Transistor العنصر الأساسي في معظم النبائط والتطبيقات الالكترونية مثل دارات تضخيم الإشارة، المذبذبات، معدات الأقمار الصناعية، التطبيقات الرقمية،.....

بشكل عام هناك نوعين أساسيين للترانزستور تبعاً لنوعية حاملات الشحنة التي تشكل التيار الكهربائي المار من خلاله:

الترانزستور ثنائي القطبية (BJT) ويتكون التيار الكهربائي من كل من حاملات الشحنة الالكترونات والثقوب.

الترانزستور الحقلي (JFET) ويتكون التيار من نوع واحد من حاملات الشحنة إما الالكترونات أو الثقوب ويسمى بالترانزستور أحادي القطبية.

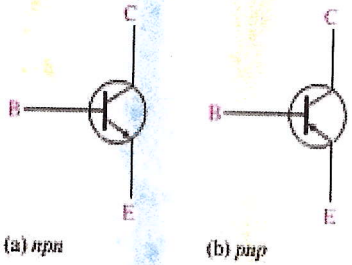
يستخدم الترانزستور ثنائي القطبية كمضخم خطي Liner Amplifier أي زيادة أو تكبير إشارة كهربائية أو كمفتاح الكتروني Electronic Switch.

الترانزستور ثنائي القطبية (BJT):

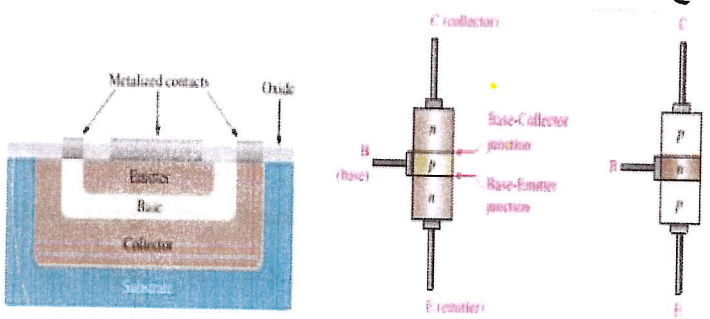
يتألف الترانزستور ثنائي القطبية من ثلاث مناطق نصف ناقلة مشوبة تفصل فيما بينها وصلتان pn كما هو موضح في الشكل (1) وتسمى المناطق الثلاث بالباعث (Emitter) والقاعدة (Base) والمجمع (Collector) على الترتيب، ويمثل الشكل (2) الرمزين الالكترونيين لترانزستورين الأول يتألف من منطقتين من النوع n وتفصل بينهما منطقة من النوع p (رمزه npn) والأخر يتألف من منطقتين من النوع p تفصل بينهما منطقة من النوع n (رمزه pnp). ويدل المصطلح ثنائي القطبية إلى استخدام الثقوب والالكترونات كحاملات للشحنة الكهربائية في تركيب الترانزستور.

تسمى الوصلة المتشكلة بين منطقة القاعدة ومنطقة الباعث بوصلة الباعث قاعدة، وتسمى الوصلة pn المكونة من منطقة القاعدة ومنطقة المجمع بوصلة المجمع–قاعدة، ويربط سلك توصيل لكل منطقة من المناطق الثلاث.

تتصف القاعدة بأنها رقيقة جداً وقليلة التطعيم بالمقارنة مع الباعث الذي يتصف بدرجة تطعيم عالية وسماكة أكبر، ويتصف المجمع بدرجة تطعيم معتدلة وسماكة كبيرة نسبياً وأكبر من سماكة الباعث بسبب سخونة الالكترونات مما تؤدي توسيع مساحة سطحه.



الشكل (2): الرمز الالكتروني ل نوعي الترانزستور BJT

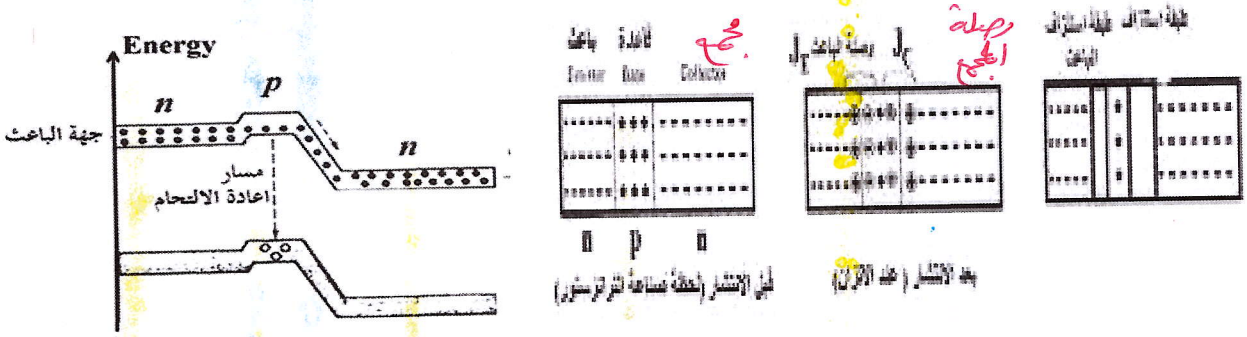


الشكل(1): بنية الترانزستور npn و pnp، ومقطع عرضي للتركيب المستوي للطبقات المشكلة للترانزستور

يبين الشكل (3) تشكل منطقة الاستنزاف ومخطط عصابات الطاقة لترانزستور npn .

نلاحظ من مخطط عصابات الطاقة للترانزستور غير المنحاز أن عصابة الناقلية للمنطقة القاعدة تقع عند مستوي طاقي أعلى من منطقة الباعث والمجمع (نصف ناقل نوع n) فسر ذلك ونلاحظ وجود سفحين طاقيين كما هو موضح في

الشكل وهذا يعني أن الالكترونات الحرة من جهة الباعث تحتاج إلى طاقة لعبور السفح الطاقي والانتقال إلى عصابة الناقلية لمنطقة القاعدة وسريان التيار الكهربائي في الترانزستور.

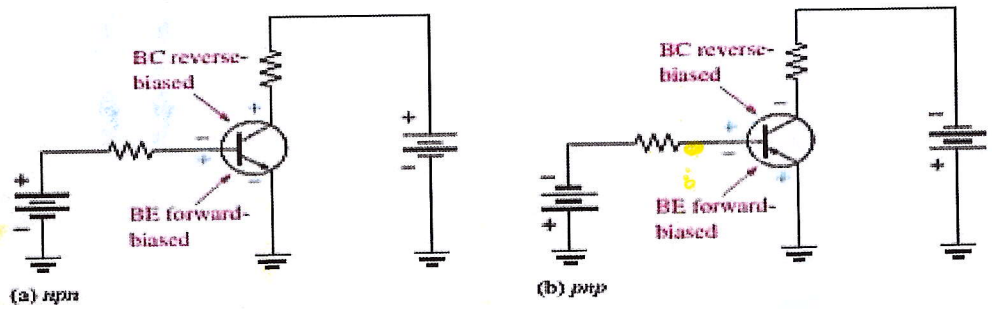


الشكل (3)

مبدأ عمل الترانزستور (BJT):

يعمل الترانزستور بشكل أساسي ك مضخم للإشارات الكهربائية الجيبية بالإضافة لعمله كمفتاح الكتروني.

كي يعمل الترانزستور كمضخم بشكل دقيق يجب تحييز الوصلتين pn بجهود خارجية مستمرة كما هو موضح في الشكل (4) . سندرس الترانزستور npn وتطبق الدراسة على ترانزستور من النوع pnp باستثناء أن أدوار الالكترونات والثقوب وتطبيقات الانحياز بالجهد، واتجاهات التيارات تنعكس، وفي كلا نوعي الترانزستور تنحاز وصلة الباعث–قاعدة (BE) أمامياً ووصلة المجمع– قاعدة (BC) عكسياً.



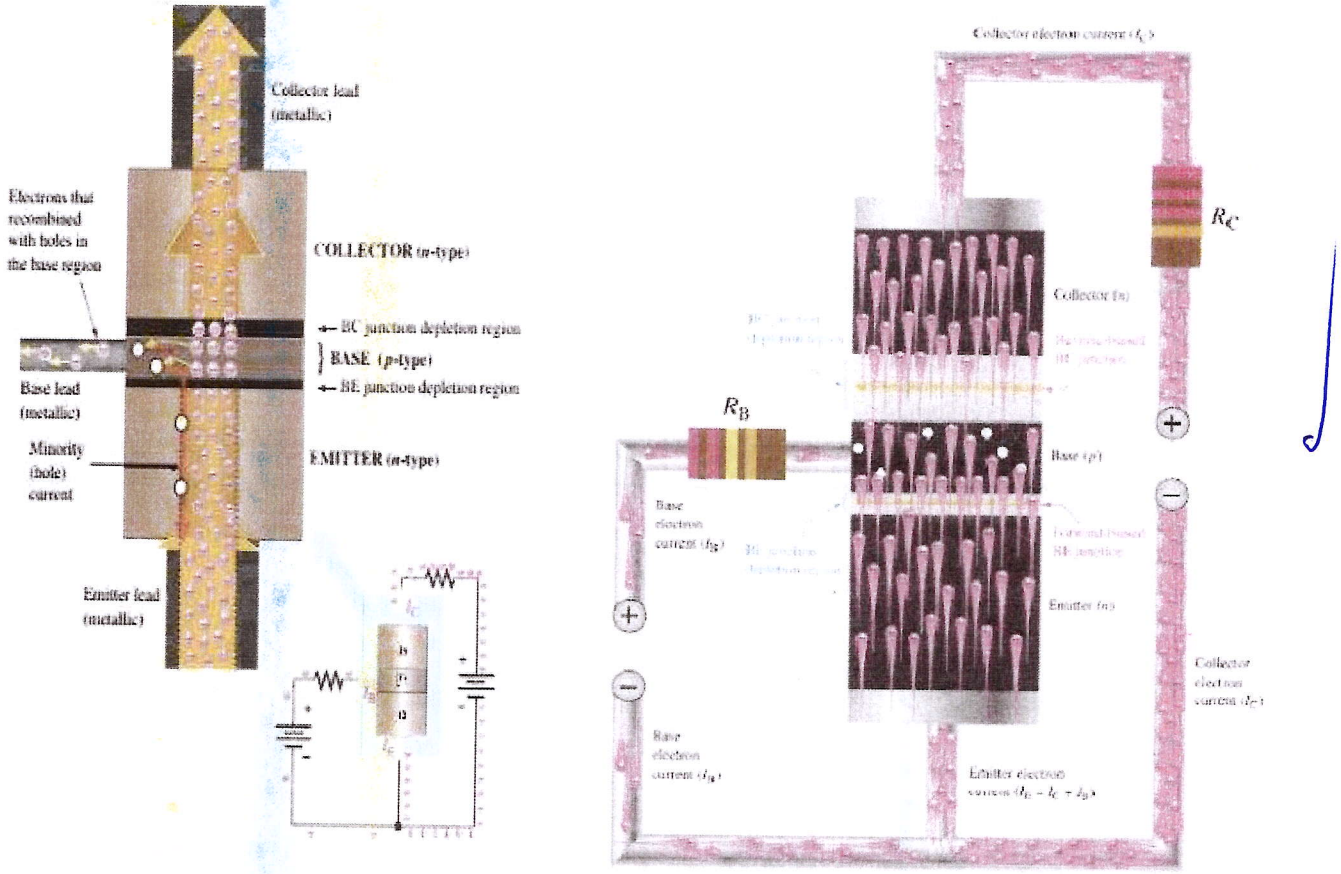
الشكل (4): دارات تحييز الترانزستور بجهود مستمرة صحيحة بنوعيه.

لشرح طريقة عمل الترانزستور سندرس ماذا يحصل داخل الترانزستور npn عند تحييزه، فالانحياز الأمامي من القاعدة إلى الباعث يضيق منطقة الاستنزاف، والانحياز العكسي من القاعدة إلى المجمع يوسع منطقة الاستنزاف، فمنطقة الباعث n المطعمة بدرجة كبيرة تعج بإلكترونات شريط الناقلية الحرة التي تنتشر بسهولة عبر الوصلة BE المنحازة أمامياً. والقاعدة مطعمة بدرجة ضعيفة ورقيقة بحيث لا يوجد فيها إلا عدد محدود من الثقوب ولهذا السبب تستطيع نسبة ضئيلة فقط من كل الالكترونات المتدفقة عبر الوصلة BE أن تتحد مع الثقوب المتوفرة في القاعدة وهذا العدد القليل نسبياً من الالكترونات (5%) يتدفق من سلك القاعدة كإلكترونات تكافؤ مكوناً تيار القاعدة الإلكتروني الصغير.

معظم الالكترونات المتدفقة من الباعث (95% من الالكترونات المحقونة من الباعث) إلى منطقة القاعدة الرقيقة والمشابة قليلاً لا يعاد اتحادها وإنما تنتشر إلى منطقة الاستنزاف BC. وحالما تصبح في هذه المنطقة فإنها تنساق عبرها تحت تأثير الحقل الكهربائي المتشكل نتيجة قوة التجاذب بين الأيونات الموجبة والسالبة. في الواقع يمكننا تصور الالكترونات

كأنها تنساق عبر الوصلة BC المنحازة عكسياً نتيجة جذب جهد تغذية المجمع وتنتقل الالكترونات الآن عبر منطقة المجمع وتخرج من سلك المجمع وتدخل في القطب الموجب لمنبع جهد المجمع وهذا ما يكون تيار المجمع الالكتروني كما هو موضح في الشكل (5).

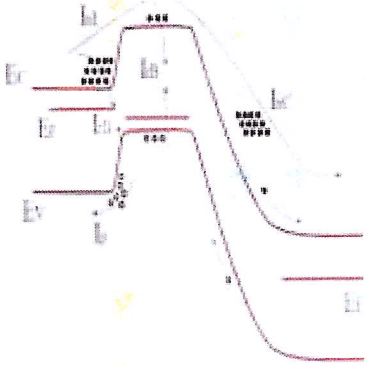
يكون عادةً تيار المجمع أكبر بكثير من تيار القاعدة بالرغم من حالة الانحياز العكسي لوصلة مجمع–باعث، وهذا هو السبب الذي يجعل الترانزستور يبدي ربحاً في التيار ويفسر نقل التيار من منطقة ذات مقاومة منخفضة إلى منطقة ذات مقاومة أعلى.

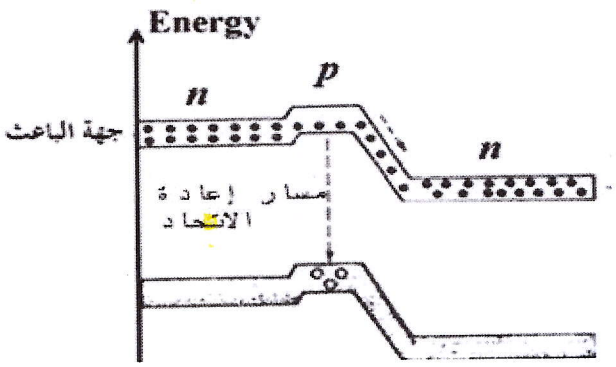


الشكل(5): آلية عمل الترانزستور ثنائي القطبية من النوع npn

ومن وجهة نظر عصابات الطاقة عند تطبيق جهد انحياز على دارة الترانزستور نلاحظ أن الانحياز الأمامي لوصلة الباعث يؤدي إلى تقليل السفح الطاقي (التل الطاقي) لوصلة الباعث وعندها تتمكن الالكترونات الحرة التي تمتلك طاقة كافية أعلى من كمون الحاجز لترانزستور مصنوع من السليكون أن تنتقل إلى عصابة الناقلية في منطقة القاعدة وتصبح عندها حاملات شحنة أقلية فيها ومن ثم تنتشر إلى طبقة استنزاف المجمع وتنحدر إلى أسفل التل الطاقي لعصابة الناقلية للمجمع وتحرر نتيجة لذلك طاقة على شكل حرارة بمقدور المجمع تبديدها، والجزء القليل المتبقي من الالكترونات المحقونة من الباعث تسقط عائدة لعصابة التكافؤ وتصبح الكترونات تكافؤية تسير عبر ثقوب القاعدة إلى سلك الناقلية الخارجي وتشكل تيار القاعدة.

يوضح الشكل (6) مخطط عصابات الطاقة لترانزستور npn منحاز بجهود مستمرة خارجية.





الشكل (6)

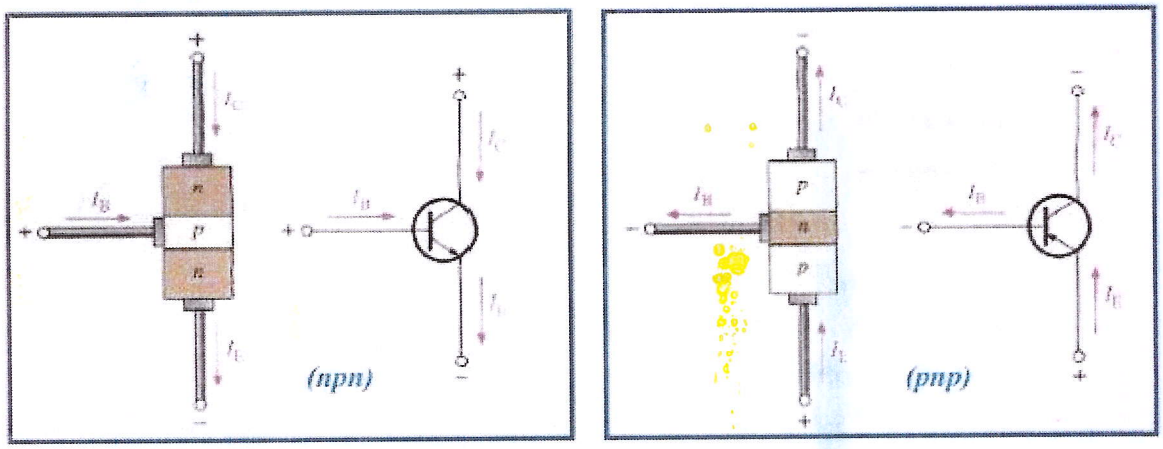
تيارات الترانزستور Transistor Currents:

يوضح الشكل (7) اتجاهات التيارات في الترانزستورين npn و pnp ورمزهما الالكترونيين حيث يشير السهم الموافق للباعث في الرمز الالكتروني للترانزستور يشير إلى الاتجاه الاصطلاحي للتيار.

تظهر هذه المخططات أن تيار الباعث I_E يساوي لمجموع تيارين هما: تيار المجمع I_C وتيار القاعدة I_B ويعبر عنه بالعلاقة:

$$I_E = I_C + I_B \qquad (1-1)$$

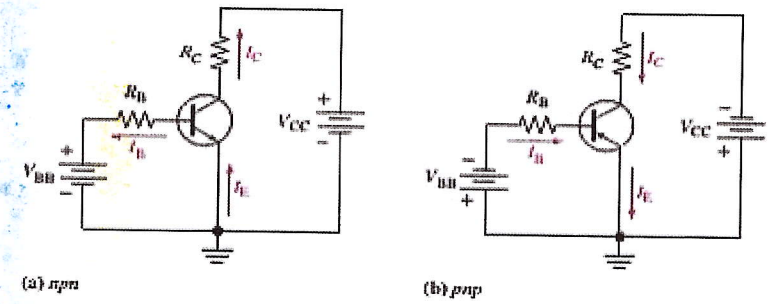
وكما ذكرنا سابقاً، فإن تيار القاعدة صغير جداً بالمقارنة مع التيارين الأخرين.



الشكل (7): اتجاهات التيار في ترانزستور BJT

المميزات الساكنة للترانزستور ومعاملاته (Transistor Characteristics and Parameters):

عندما يربط ترانزستور ما بجهود انحياز مستمرة كما هو موضح بالشكل (8) من أجل كلا النوعين npn و pnp فإن الجهد V_{BB} يحيز وصلة الباعث–قاعدة أمامياً، و يحيز V_{CC} وصلة المجمع–قاعدة عكسياً. (عملياً تؤخذ الجهود المستعملة من منبع التغذية المستمر حيث يؤخذ الجهد V_{CC} مباشرة من خرج منبع التغذية بشكل طبيعي و V_{BB} يمكن الحصول عليه باستخدام مقسم جهد.



الشكل (8): دارات انحياز الترنزستور

المعاملان الساكنان β_{DC} و α_{DC}:

تمثل β_{DC} عامل الربح بالتيار المستمر ويعبر عنها بالعلاقة (2−1) الممثلة بنسبة تيار المجمع المستمر إلى تيار القاعدة المستمر أي: $\beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B}$ (2 − 1)

ويتأرجح مجال القيم النموذجية لها بين أقل من 20 أو حتى 200 أو أعلى من أجل بعض الترانزستورات الخاصة.

وتعرف نسبة تيار المجمع المستمر إلى تيار الباعث المستمر بالمتحول α_{DC} الساكنة وهو أقل استخداماً من المتحول β_{DC} في دارات الترانزستور ويعبر عنه بالعلاقة (3−1):

$$\alpha_{DC} = \frac{I_C}{I_E} \qquad (1-3)$$

والقيم النموذجية له تتأرجح بين 0.95 و 0.99 ويعود السبب إلى أن تيار المجمع المستمر أقل من تيار الباعث بقليل.

مثال: أوجد قيمة I_E وβ_{DC} من أجل ترانزستور علماً أن $I_C = 3.65mA$ و $I_B = 50\mu A$.

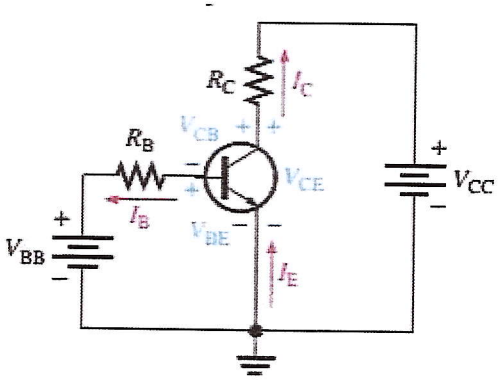
الحل: $\beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{3.65}{50} = 73$ ومنه $I_E = I_C + I_B = 3.65 + 0.05 = 3.70mA$

تحليل التيارات والجهود Current Voltage Analysis:

بدراسة دارة الانحياز الأساسي للترانزستور الموضحة في الشكل (9) حيث يمكننا أن نعرف ثلاثة تيارات وثلاثة جهود مستمرة وهي:

I_B و I_E و I_C تيار القاعدة المستمر وتيار الباعث المستمر وتيار المجمع المستمر على الترتيب.

V_{BE} و V_{CB} وV_{CE} جهد القاعدة بالنسبة للباعث، جهد المجمع بالنسبة للقاعدة، جهد المجمع بالنسبة للباعث على الترتيب.



الشكل (9): دارة الانحياز الأساسي للترانزستور npn

إن V_{BB} يحيز وصلة الباعث–قاعدة أمامياً، و V_{CC} يحيز وصلة المجمع –قاعدة عكسياً. وعندما تتحاز وصلة الباعث–قاعدة أمامياً فإنها تماثل الديود المنحاز أمامياً وتملك هبوط جهد أمامي محدد يساوي إلى:

$$V_{BE} = 0.7V \quad (1-4)$$

نلاحظ من الدارة بما أن الباعث مؤرض (0V) فحسب قانون كيرشوف للجهد نجد أن هبوط الجهد بين طرفي المقاومة R_B يساوي إلى: $V_{BB} = V_{R_B} + V_{BE}$ ومنه

$$V_{R_B} = V_{BB} - V_{BE} \quad (1-5)$$

ومن قانون أوم $V_{R_B} = I_B R_B$ وبالتعويض في (1-5) نحصل على عبارة تيار القاعدة المعبر عنها بالمعادلة (1-6):

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \quad (1-6)$$

وتكون عبارة جهد المجمع بالنسبة للباعث المؤرض من الشكل المعبر عنه بالمعادلة (1-7) انطلاقاً من العلاقة:

$$V_{CC} = V_{R_C} + V_{CE}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{R_C} \quad (1-7)$$

وهبوط الجهد على مقاومة المجمع يعبر عنه بالعلاقة : $V_{R_C} = I_C R_C$ ومنه يمكننا أن نكتب عبارة الجهد عند المجمع وفق المعادلة (1-8):

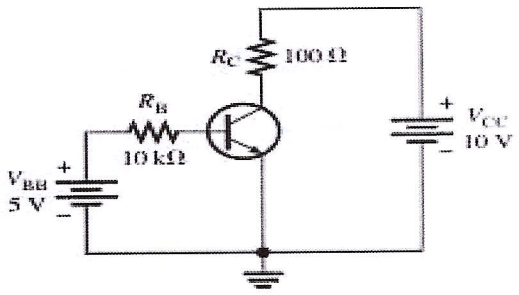
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \quad (1-8) \qquad I_C = \beta_{DC} I_B \text{ حيث}$$

ويساوي الجهد بين طرفي وصلة المجمع–قاعدة المنحازة عكسياً وفق العلاقة:

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

ومنه $V_{CB} = V_{CE} - V_{BE}$ (1 − 9)

مثال: أوجد قيم I_B و I_C وI_E و V_{BE} و V_{CE} و V_{CB} في الدارة المبينة في الشكل المجاور علماً بأن الترانزستور يملك عامل ربح ساكن $\beta_{DC} = 150$.



حل: نحصل من المعادلة (4 − 1) على $V_{BE} = 0.7V$

حسب تيارات القاعدة والمجمع والباعث وفق المعادلات (1-6) و (1-2) و(1-1) كما يلي:

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0.7}{10} = 430\mu A$$

$$I_C = \beta_{DC} I_B = 150 * 430 * 10^{-6} = 64.5mA$$

$$I_E = I_C + I_B = 64.5 + 0.43 = 64.9mA$$

حل المعادلات (1-9) و(1-8) نحصل على قيم V_{CE} و V_{CB} كما يلي:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 10 - (64.5 * 10^{-3}) * 100 = 3.55V$$

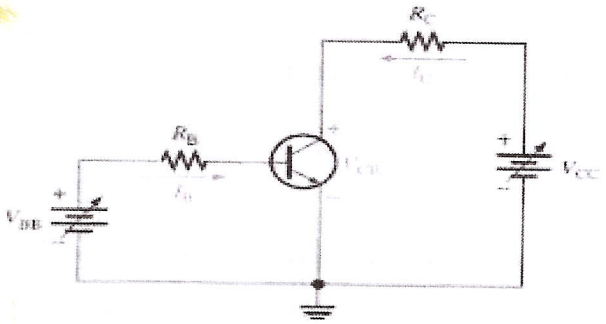
$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} = 3.55 - 0.7 = 2.85\ V$$

وبما أن المجمع يقع عند جهد أعلى من جهد القاعدة فإن الوصلة مجمع–قاعدة تكون في حالة انحياز عكسي.

المنحنيات المميزة للمجمع Collector Characteristic Curves:

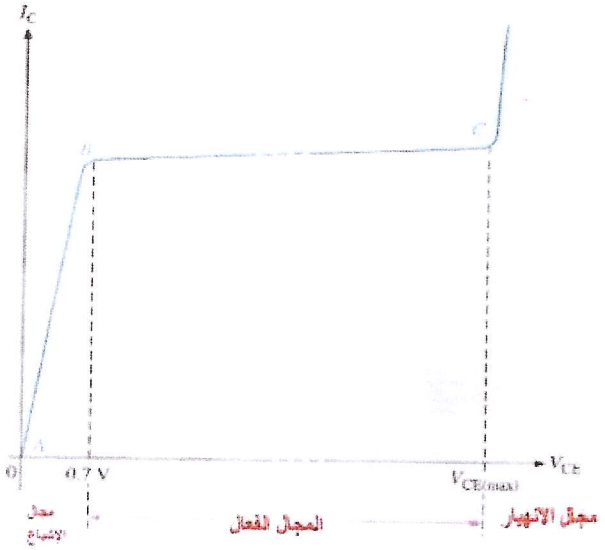
يمكننا الحصول على مجموعة المنحنيات المميزة للمجمع اعتماداً على الدارة الموضحة بالشكل (10) (وصلة الباعث المشترك) والتي توضح كيف يتغير تيار المجمع I_C عند تغير جهد المجمع بالنسبة للباعث V_{CE} من أجل قيم محددة لتيار القاعدة I_B .

أولاً: نفرض أن V_{BE} يعطي قيمة محددة لتيار القاعدة و V_{CC} يساوي الصفر في هذه الحالة تكون كلتا الوصلتين وصلة الباعث–قاعدة ووصلة المجمع–قاعدة في حالة انحياز أمامي لأن القاعدة تكون عند الجهد 0.7V تقريباً في حين أن الباعث والمجمع يكون عند الجهد 0V ويمر تيار القاعدة من وصلة الباعث–قاعدة لأن ممانعة المسار إلى الأرضي ضعيفة ولذلك فإن تيار المجمع I_C يساوي الصفر. عندما تنحاز كلتا الوصلتين أمامياً فإن الترنزستور يكون في منطقة الإشباع من عمله.

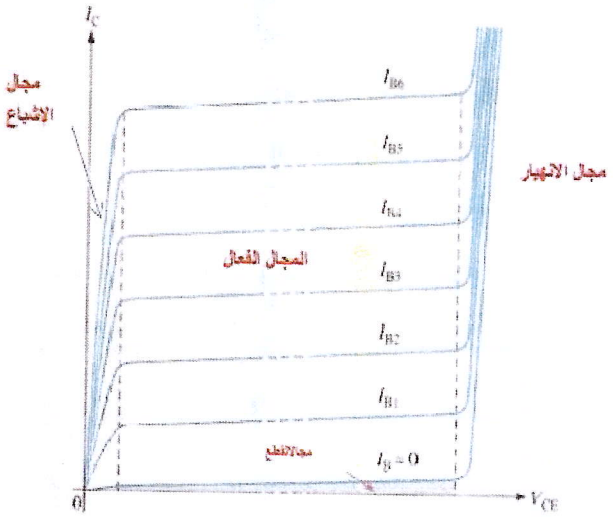


الشكل(10): دارة الباعث المشترك

عند ازدياد V_{CC} يزداد V_{CE} تدريجياً ويرتفع بالتالي تيار المجمع، وهذا ما يشير إليه جزء المنحني المميز الواقع بين النقطتين A و B في الشكل (11) فالتيار I_C يرتفع بازدياد V_{CC} لأن V_{CE} يبقى أقل من 0.7V بسبب انحياز الوصلة مجمع–قاعدة أمامياً.



الشكل (11): تغيرات I_C كتابع ل V_{CE} من أجل قيمة محددة ل I_B



الشكل (12): $I_C = f(V_{CE})$ من أجل عدة قيم ل I_B

ثانياً: في الحالة المثالية عندما يتجاوز V_{CE} القيمة 0.7V فإن وصلة المجمع–قاعدة تصبح في حالة انحياز عكسي ويكون الترانزستور في المنطقة النشطة أو الخطية من عمله. وبما أن وصلة مجمع–قاعدة منحازة عكسياً فإن التيار I_C يتوقف عن الزيادة وعملياً يبقى ثابت من أجل القيمة المعطاة لتيار القاعدة عند الاستمرار بزيادة V_{CE}.

في الواقع يزداد تيار المجمع I_C بشكل ضعيف جداً بارتفاع V_{CE} بسبب توسع منطقة الاستنزاف لوصلة مجمع–قاعدة المنحازة عكسياً وهذا ما يوفر الفرصة المناسبة لعدد أقل من الثقوب الأقلية لتعيد اتحادها مع الالكترونات في منطقة القاعدة التي تسبب زيادة بسيطة في الربح بالتيار (β_{DC}) بشكل فعال. وهذا ما يوضحه جزء المنحني المميز الواقع بين النقطتين C و B من الشكل (11) وفي هذا الجزء من المنحني المميز تتعين قيمة التيار I_C من العلاقة (2–1) فقط.

ثالثاً: عندما يبلغ قيمة V_{CE} جهداً عالياً جداً تؤول وصلة المجمع–قاعدة المنحازة عكسياً إلى حالة الانهيار ويزداد تيار المجمع بشكل كبير كما يوضح جزء المنحني المميز الواقع على يمين النقطة C يجب أن لا يعمل الترانزستور في منطقة الانهيار على الإطلاق.

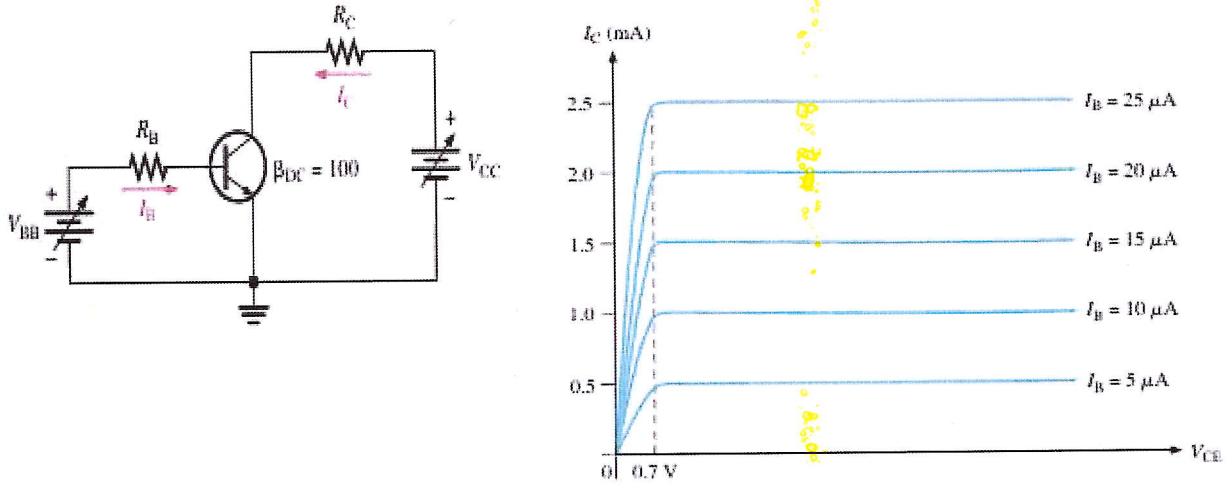
يوضح الشكل (12) مجموعة المنحنيات المميزة للمجمع المرسومة كعلاقة بين التيار I_C والجهد V_{CE} من أجل عدة قيم ل تيار القاعدة. فعندما يكون تيار القاعدة معدوماً $(I_B = 0)$ فإن الترانزستور يكون في منطقة القطع Cut Off على الرغم من وجود تيار تسرب صغير جداً للمجمع.

مثال: ارسم مجموعة مثالية من منحنيات المجمع من أجل الدارة المبينة في الشكل المجاور علماً بأن قيم I_B تزداد من $5\mu A$ حتى $25\mu A$ كل $5\mu A$ و $\beta_{DC} = 100$ و V_{CE} لا يتجاوز جهد الانهيار.

الحل: نوجد قيمة I_C من العلاقة (2–1) $I_C = \beta_{DC} I_B$ كما هو موضح في الجدول المرفق.

$I_B(\mu A)$	5	10	15	20	25
$I_C(mA)$	0.5	1	1.5	2	2.5

الشكل(13): يمثل المنحنيات المميزة للمجمع $I_C = f(V_{CE})$ من أجل قيم مختلفة ل I_B



الشكل (13)

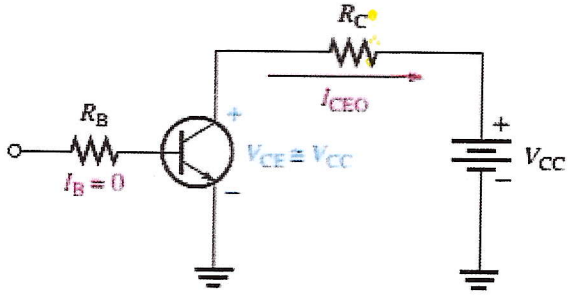
خط الحمل الساكن DC Load Line

ندرس كل من حالتي القطع والإشباع.

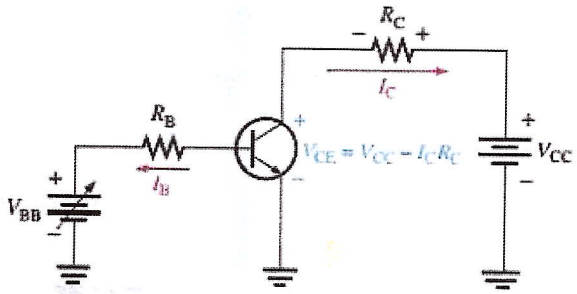
دراسة حالة القطع Cut Off : بدراسة الدارة الموضحة في الشكل (14) يكون الترانزستور في منطقة القطع من عمله عندما $I_B = 0$ وفي هذه الحالة يكون مربط القاعدة مفتوحاً وبتوفر شرط كهذا توجد كمية صغيرة جداً من تيار المجمع المتسرب I_{CEO} الناتج في معظمه من الحاملات المتولدة حرارياً. وبما أن تيار تسريب المجمع صغير للغاية فعادة ما يهمل في تحليل الدارات بحيث يصبح الجهد بين طرفي وصلة المجمع–قاعدة يساوي إلى V_{CC} وفي حالة القطع تكون كلتا الوصلتين وصلة الباعث–قاعدة ووصلة المجمع–قاعدة في حالة انحياز عكسي.

دراسة حالة الإشباع Saturation:

عندما تصبح حالة وصلة الباعث–قاعدة في خالة انحياز أمامي وتيار القاعدة متزايد فإن تيار المجمع يزداد أيضاً وفق علاقة الربح بالتيار β_{DC} ويتناقص هبوط الجهد بين طرفي وصلة الباعث–مجمع نتيجة هبوط أكبر للجهد بين طرفي مقاومة المجمع (العلاقة (8–1)) كما هو موضح في الشكل (15). فعندما يبلغ V_{CE} قيمة الإشباع $V_{CE(Sat)}$ تصبح وصلة المجمع–قاعدة في حالة انحياز أمامي وعندها لا يمكن ل تيار المجمع أن يزداد على الرغم من زيادة تيار القاعدة. وعند الوصول إلى نقطة الإشباع هذه لا تعود العلاقة (2–1) صالحة وبالتالي لا تكون محقق لأن تيار المجمع أصبح أصغر بكثير من $\beta_{DC}I_B$ فجهد الإشباع $V_{CE(Sat)}$ من أجل ترانزستور ما يمكن أن يحصل في نقطة ما تحت نقطة تحدب منحنيات المجمع.

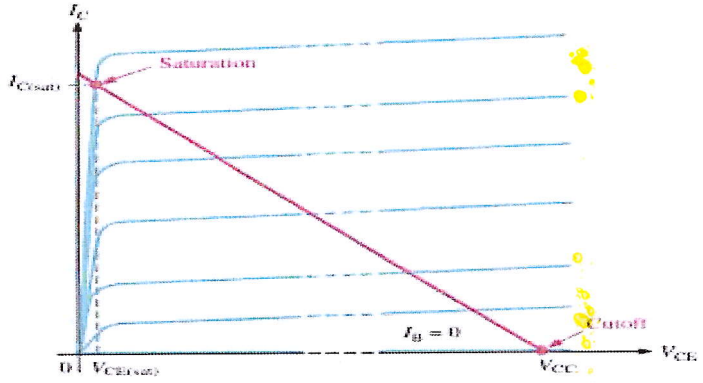


الشكل (14): دارة ترانزستور يعمل في منطقة القطع



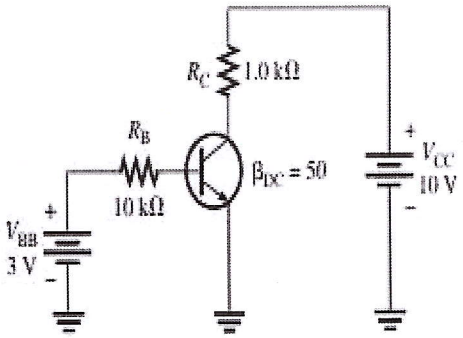
الشكل (15): دارة ترانزستور يعمل في منطقة الإشباع

توضح حالتي القطع والإشباع للترانزستور باستعمال خط الحمل الساكن الموضح في الشكل (16) والذي يمثل بخط مستقيم يصل بين نقطة القطع ونقطة الإشباع للترانزستور المدروس على مجموعة المنحنيات المميزة للمجمع حيث يوافق أسفل خط الحمل نقطة قطع مثالية حيث $I_C = 0$ و $V_{CE} = V_{CC}$ ويوافق نقطة الإشباع أعلى الخط حيث حيث $I_C = I_{C(Sat)}$ و $V_{CE} = V_{CE(Sat)}$ وتقع المنطقة النشطة (الفعالة) لعمل الترانزستور بين هاتين النقطتين.



الشكل(16): خط الحمل الساكن وتحديد نقطتي الإشباع والقطع.

مثال: حدد فيما إذا كان الترانزستور في الشكل المجاور في منطقة الإشباع أم لا، بفرض أن $V_{CE(Sat)} = 0.2V$؟



الحل: أولاً نحدد قيمة تيار الإشباع وفق العلاقة:

$$I_{C(Sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(Sat)}}{R_C} = \frac{10 - 0.2}{1k\Omega} = 9.8mA$$

ومن ثم نحسب قيمة تيار القاعدة لتبين إذا كان بإمكانه إنتاج تيار الإشباع أم لا

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

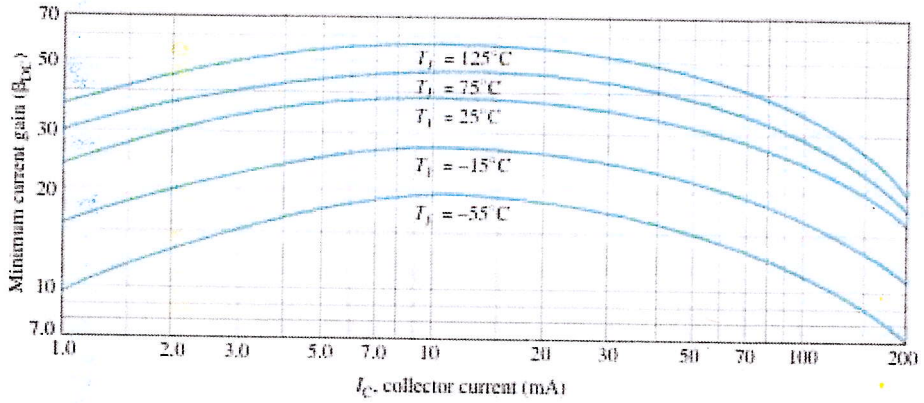
ومنه نحسب تيار المجمع وفق علاقة الربح بالتيار

$$I_C = \beta_{DC} I_B = 50 * 0.23 * 10^{-3} = 11.5mA$$

هذا يبين أن تيار القاعدة من أجل قيمة معينة للربح بالتيار قادر على إنتاج تيار مجمع أكبر من $I_{C(Sat)}$ وبهذا نستنتج أن الترانزستور يكون مشبعاً ولا يمكن بلوغ قيمة تيار المجمع $11.5mA$ على الإطلاق، وإذا زدنا تيار القاعدة أكثر يبقى تيار المجمع عند قيمته المشبعة.

العوامل التي يتعلق بها الربح بالتيار β_{DC}:

يعد الربح بالتيار المستمر β_{DC} (يرمز له في بيانات الترانزستور بالرمز h_{FE}) من المعاملات الهامة للترانزستور ثنائي القطبية. إن المعامل β_{DC} ليس ثابتاً تماماً وإنما يتغير مع تيار المجمع I_C ودرجة الحرارة، فمن أجل درجة حرارة ثابتة وزيادة تيار المجمع نلاحظ أن عامل الربح بالتيار β_{DC} يزداد ويصل لقيمة عظمى والاستمرار بزيادة تيار المجمع إلى ما بعد القيمة العظمى يؤدي إلى تناقص β_{DC}. أما في حال بقي I_C ثابتاً وتغيرت درجة الحرارة فنلاحظ أن β_{DC} يتناسب طرداً مع درجة الحرارة، حيث أن رفع درجة الحرارة يجعل β_{DC} يزداد والعكس بالعكس. وهذا ما يوضحه الشكل (17) والذي يبين تغيرات β_{DC} مع I_C ودرجة الحرارة من أجل ترانزستور نموذجي.



الشكل (17): تغيرات β_{DC} مع I_C ودرجة الحرارة من أجل ترانزستور نموذجي.

القيم الأعظمية التي يتصف بها الترانزستور ثنائي القطبية Maximum Transistor Power:

يتصف الترانزستور ثنائي القطبية كأي جهاز الكتروني بقدرته المحدودة على العمل، حيث لكل ترانزستور هناك منطقة عمل معينة يستطيع العمل ضمنها دون أن تتجاوز التيارات المارة عبره والجهود بين أطرافه الحدود القصوى لتحمله أو أن يحدث تشوه (Distoration) للإشارة الداخلة المراد تكبيرها.

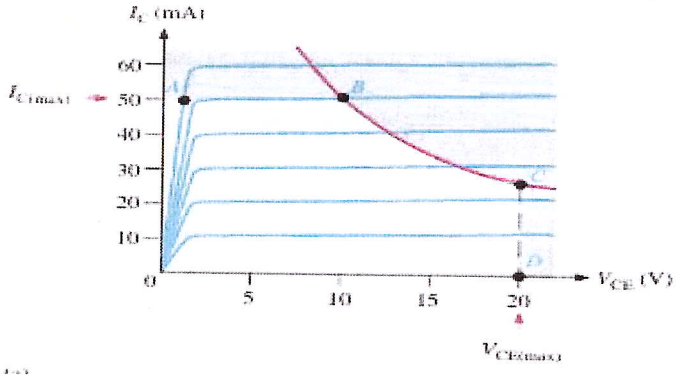
فالقيم التقديرية الأعظمية التي تكون مدونة على لائحة المعطيات من قبل المصنع هي التي تقرر حدود عمل الترانزستور وتتمثل القيم التقديرية الأعظمية الخاصة به في الجهد بين المجمع والقاعدة والجهد بين المجمع والباعث والجهد بين الباعث والقاعدة وتيار المجمع والاستطاعة المتشتتة.

تعطى علاقة الاستطاعة العظمى للترانزستور ثنائي القطبية بالعلاقة (1-10):

$$P_{D(max)} = V_{CE} * I_C \qquad (1-10)$$

يجب ألا يتجاوز حاصل ضرب V_{CE} في I_C الاستطاعة العظمى المتشتتة فلا يمكن أن تكون قيمتا V_{CE} و I_C أعظميتين بأن معاً فإذا كان الجهد بين المجمع والباعث أعظمياً فيجب أن يحسب تيار الإشباع من العلاقة (1-10) وفق الأتي: $I_C = \frac{P_{D(max)}}{V_{CE}}$ وبالعكس إذا كان I_C أعظمياً فيمكن إعادة كتابة علاقة V_{CE} انطلاقاً من علاقة الاستطاعة العظمى وفق الشكل الآتي: $V_{CE} = \frac{P_{D(max)}}{I_C}$

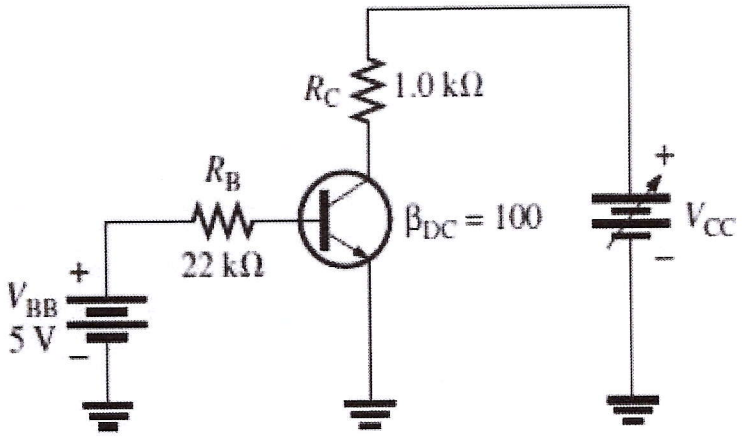
ويمكن رسم منحني الاستطاعة الأعظمية المتشتتة من أجل أي ترانزستور على المنحنيات الساكنة المميزة لمجمع الترانزستور كما هو موضح في الشكل (18).



الشكل(18): منحني الاستطاعة العظمى المتشتتة

نلاحظ من الخط البياني أن الترانزستور لا يمكن أن يعمل في القسم المظلل من المنحني فالتيار الأعظمي محدود بالقيم التقديرية الواقعة بين النقطتين A و B، و $P_{D(max)}$ محددة بالقيم التقديرية الواقعة بين النقطتين B و C، و $V_{CE(max)}$ محدد بالقيم الواقعة بين النقطتين C و D.

مثال: يتصف الترانزستور الموضح في الشكل المجاور بالقيم التقديرية الأعظمية التالية: $P_{D(max)} = 800mW$ و $V_{CE(max)} = 15V$ و $I_{C(max)} = 100mA$. والمطلوب عين القيمة العظمى التي يمكن عندها ضبط الجهد V_{CC} بدون أن يتجاوز القيمة التقديرية. وحدد القيمة التقديرية التي سيتم تجاوزها أم لا؟



أولاً نحسب قيمة I_B من العلاقة (6-1)

من أجل حساب تيار المجمع لتحديد قيمة V_{CC}.

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

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

نلاحظ أن I_C أقل بكثير من $I_{C(max)}$ ولن يتغير عند تغيير V_{CC} ويتعين من I_B وβ_{DC} فقط.

والجهد بين طرفي المقاومة R_C يساوي إلى:

$$V_{R_c} = I_C R_C = (19.5)(1k\Omega) = 19.5V$$

يمكننا تعيين قيمة V_{CC} عندما $V_{CE} = V_{CE(max)} = 15V$ وفق العلاقة $V_{R_c} = V_{CC} - V_{CE}$

ومنه $V_{CC(max)} = V_{CE(max)} + V_{R_c} = 15 + 19.5 = 34.5V$

إذن يمكننا زيادة V_{CC} ضمن الشروط المتوفرة قبل أن يتجاوز الجهد $V_{CE(max)}$حده ولكن ليس معدوماً إن تجاوزت $P_{D(max)}$ حدها أم لا.

$$P_D = (15)(19.5mA) = 293mW < P_{D(max)}$$

وبما أن الاستطاعة الأعظمية $800mW$ فهذا يعني أن الاستطاعة الأعظمية المتشتتة لن تتجاوز حدها عندما $V_{CC} = 34.5V$ وفي هذه الحالة تعتبر القيمة $V_{CE(max)} = 15V$ حداً تقريباً. وإذا أخذ تيار القاعدة القيمة صفر أي يصبح الترانزستور في مرحلة القطع وبالتالي فإن الجهد $V_{CE(max)}$ سيتجاوز قيمته الحدية أولاً لأن كامل جهد التغذية V_{CC} سيهبط على الترانزستور.

الوظيفة الأساسية للترانزستور عمله كمضخم والمقصود بذلك هو العملية التي يحصل خلالها ازدياد خطي في سعة الإشارة الكهربائية بالإضافة لعمله كمفتاح الكتروني، سنناقش مبدأ عمل الترانزستور في كل منهما ولكن سنتعرف على الكميات المستمرة والمتناوبة أولاً.

الكميات المتناوبة والمستمرة:

تشير الأحرف الكبيرة على التيارات والجهود المستمرة والمتناوبة معاً وتنطبق هذه القاعدة على القيمة التربيعية الوسطية والقيمة العظمى للمطال والقيمة الفاصلة بين القيمتين الأعظمية والأصغرية المتعاقبتين.

تمثل الكميات I_E وI_C وI_B التيارات المستمرة للترانزستور، والكميات V_{CE} و V_{CB} و V_{BE} جهود الترانزستور المستمرة بين الطرفين، وتمثل الجهود المستمرة بين أطراف الترانزستور والأرضي ب V_C و V_B و V_E.

وتمثل I_e وI_c وI_b التيارات المتناوبة للترانزستور، والكميات V_{ce} و V_{cb} و V_{be} جهود الترانزستور المتناوبة بين الطرفين، وتمثل الجهود المتناوبة بين أطراف الترانزستور والأرضي ب V_c و V_b و V_e.

بالإضافة أن الترانزستور يمتلك مقاومة داخلية للتيار المتناوب r'_e وتدعى بالمقاومة الأمامية الديناميكية للباعث، أم المقاومات الخارجية الموصولة إلى ترانزستور تمثل بأحرف كبيرة مع دليل إذا كانت للتيار المستمر أو المتناوب كما في التيارات والجهود.

آلية عمل الترانزستور كمفتاح الكتروني The Transistor As a Switch:

يستخدم الترانزستور كدارة إغلاق وفتح (أي مفتاح الكتروني) حيث عند استخدامه هكذا يعمل الترانزستور في منطقتي القطع والإشباع بالتعاقب كما يستفاد من هذه الخاصية للترانزستور في الدارات الرقمية.

يوضح الشكل (19) مبدأ عمل الترانزستور كجهاز إغلاق وفتح. ويكون الترانزستور في منطقة القطع من عمله لأن وصلة الباعث–قاعدة ليست منحازة أمامياً وفي هذه الحالة من الناحية المثالية يوجد فتح بين المجمع والباعث ويكون الترانزستور في منطقة الإشباع من عمله لأن وصلتي الباعث–قاعدة ووصلة المجمع–قاعدة تكون في حالة انحياز أمامي وتيار القاعدة الناتج يكون كبيراً كفاية ليجعل تيار المجمع يبلغ قيمته المشبعة وفي هذه الحالة يوجد قصر (إغلاق) بين المجمع والباعث

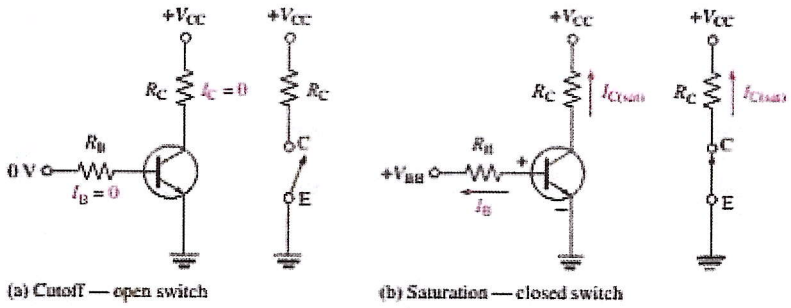
شروط تحقيق حالة القطع: يكون الترانزستور في منطقة القطع عندما لا تتجاوز وصلة الباعث–قاعدة أمامياً وبإهمال تيار التسرب تكون جميع التيارات في الترانزستور مساوية للصفر و V_{CE} يساوي إلى V_{CC} أي:

$$V_{CE(Cut\ Off)} = V_{CC} \qquad (1-11)$$

شروط تحقيق حالة الإشباع: عندما تكون وصلة الباعث–قاعدة منحازة أمامياً ويتوفر تيار قاعدة كافٍ لإنتاج تيار مجمع أعظمي فإن الترانزستور يكون مشبعاً وفي هذه الحالة تكون علاقة تيار الإشباع للمجمع من الشكل التالي:

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(Sat)}}{R_C} \qquad (1-12)$$

وبما أن قيمة $V_{CE(Sat)}$ صغيرة جداً مقارنة بقيمة V_{CC} فإن القيمة الدنيا لتيار القاعدة الضرورية لتأمين حالة الإشباع تساوي إلى: $I_{B(min)} = \frac{I_{C(sat)}}{\beta_{DC}}$ (1 – 13) ويجب أن يكون تيار القاعدة أكبر بكثير من $I_{B(min)}$ حتى يحافظ الترانزستور على حالة الإشباع.



الشكل(19): الترانزستور كمفتاح الكتروني

تطبيق على استخدام الترانزستور كمفتاح الكتروني:

استخدام الترانزستور الموضح في الشكل المجاور كمفتاح الكتروني لتشغيل الديود الباعث للضوء وإيقافه.

بتطبيق إشارة دخل مربع دورها 2s على مدخل الدارة نلاحظ أن جهد الإشارة المربعة يكون معدوم وبالتالي الترانزستور في حالة القطع ويكون تيار المجمع معدوم وعندما تصبح الموجة المربعة بقيمتها العظمى فإن الترانزستور يصبح في حالة الإشباع أي الديود الباعث للضوء يصبح في حالة انحياز أمامي ويحتاج الديود الباعث للضوء تياراً قيمته $30mA$ لإصدار ضوء كافٍ هذا يعني أن تيار المجمع يساوي $I_C = 30mA$ وفي هذه الحالة يضيء الديود الموصول مع مجمع الترانزستور خلال ثانية وينطفئ في الثانية اللاحقة وهكذا .....

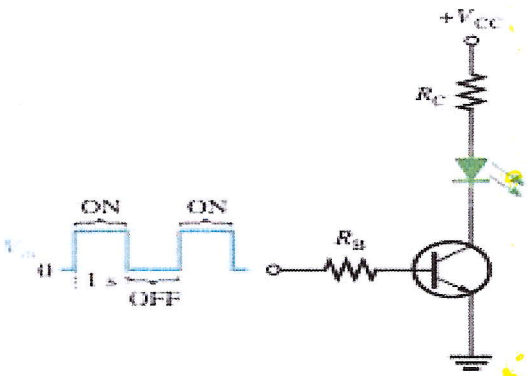
إيجاد سعة الموجة المربعة لجهد الدخل اللازم لجعل الترانزستور مشبعاً من أجل القيم الأتية:

$R_C = 270\Omega$ و $R_B = 3.3k\Omega$ و $V_{CC} = 9V$ و $V_{CE(sat)} = 0.3V$ و $\beta_{DC} = 50$

بتطبيق العلاقة $I_{C(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(Sat)}}{R_C}$ نحصل على قيمة تيار المجمع المشبع والذي يساوي إلى $0.032A$

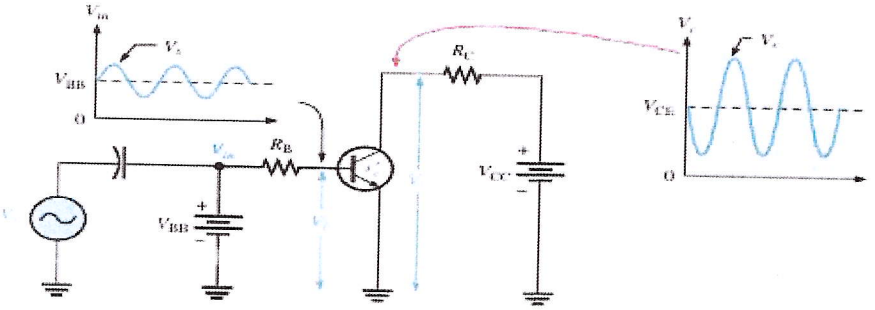
ومنه نحسب قيمة تيار القاعدة الصغرى والتي تساوي وفق العلاقة (1-13) إلى $I_{B(min)} = 644\mu A$ ، كي يحافظ الترانزستور على حالة الإشباع يجب أن يكون تيار القاعدة أكبر بكثير من $I_{B(min)}$ ولضمان عملية الإشباع سنأخذ ضعف هذه القيمة أي تصبح تقريباً $2I_{B(min)} \cong 1.29mA$ وتحسب قيمة جهد الدخل كما يلي:

$$2I_B = \frac{V_{in} - V_{BE}}{R_B} \rightarrow V_{in} = 2I_B\, R_B + 0.7 = 4.96V$$



عمل الترانزستور كمضخم Transistor Amplification:

يضخم الترانزستور التيار ونعلم أن تيار المجمع يساوي إلى $I_C = \beta_{DC} I_B$ وبما أن تيار القاعدة صغير جداً في الترانزستور مقارنةً مع تياري المجمع والباعث ولهذا السبب يساوي تيار المجمع تيار الباعث تقريباً ومنه $I_C = I_E$ لتكن لدينا الدارة الموضحة في الشكل (20) حيث يلاحظ إضافة الجهد المتناوب V_{in} إلى جهد الانحياز المستمر V_{BB} اللذان يربطان مع مقاومة القاعدة على التسلسل، يسبب جهد الدخل المتناوب مرور تيار في القاعدة يسبب بدوره مرور تيار متناوب في المجمع بقيمة أكبر بكثير من قيمة تيار القاعدة المتناوب $I_c \geq I_b$ ويؤدي ظهور تيار المجمع المتناوب إلى هبوط جهد متناوب بين طرفي مقاومة المجمع R_C وبالتالي إعادة تشكيل جهد الدخل المتناوب بشكل مضخم ومقلوب (مضخم عاكس) في المنطقة الفعالة للترانزستور.



الشكل (20)

سنحلل الدارة : إن وصلة الباعث–قاعدة المنحازة أمامياً تبدي مقاومة ضعيفة جداً للإشارة المتناوبة ونرمز لهذه المقاومة الداخلية للباعث بالرمز r'_e وأصبح تيار الباعث يساوي إلى:

$I_e \cong I_c = \frac{V_b}{r'_e}$ ويساوي جهد المجمع المتناوب إلى هبوط الجهد المتناوب بين طرفي مقاومة المجمع R_C وفق العلاقة: $V_c = I_c R_c$

وبما أن $I_e \cong I_c$ فإن جهد المجمع المتناوب يساوي إلى $V_c = I_e R_c$

وباعتبار أن V_b جهد دخل متناوب للترانزستور حيث $V_{in} = V_{R_B} + V_b$ ومنه $V_b = V_{in} - I_b R_B$ ويمكننا اعتبار الجهد V_c جهد خرج متناوب للترانزستور ومنه نعرف معامل الربح بالجهد المتناوب لدارة الترانزستور A_v بأنه نسبة جهدالخرج المتناوب إلى دخل الجهد المتناوب وفق العلاقة (14–1): $A_v = \frac{V_c}{V_b}$ $(1-14)$

وبالتعويض عن علاقة جهد الخرج والدخل تؤول العلاقة (14–1) إلى الشكل (15–1):

$$A_v = \frac{V_c}{V_b} = \frac{I_e R_c}{I_e r'_e} = \frac{R_c}{r'_e} \qquad (1-15)$$

وتبين هذه العلاقة أن الترانزستور في الدارة المدروسة يضخم إشارة الدخل ويعطي ربحاً بالجهد المتناوب مرتبطاً بكل من مقاومة الخرج R_c ومقاومة الدخل r'_e حيث $R_c \gg r'_e$ وبالتاي يكون جهد الخرج أكبر من جهد الدخل دوماً.

مثال: أوجد الربح بالجهد وجهد الخرج المتناوب في الدارة السابقة إذا علمت أن $r'_e = 50\Omega$ و $R_c = 1k0\Omega$ و $V_b = 100mV$

الحل: بتطبيق العلاقة (15–1) نحصل على الربح في الجهد ويساوي إلى $A_v = 20$

ونحصل من هذه العلاقة على القيمة التالية لجهد الخرج المتناوب للترانزستور:

$$V_c = V_{out} = A_v V_b = (20)(100mV) = 2V$$