

الفصل الثالث الترانزستور ثنائي القطبية

1.3 تعريفات :

الترانزستور كلمة مركبة مشتقة من كلمتين Transfert-resistor أي تحويل المقاومة و معناها كهربائيا هو وجود علاقة بين مقاومتي المدخل و المخرج لدائرة كهربائية. أي أن مقاومة المخرج تتغير مع تغير مقاومة المدخل. وينتج عن ذلك تضخيم في الإستطاعة (الجهد أو التيار). عادة ما نقول عن الترانزستور أنه مركب أو عنصر فعال بخلاف العناصر الكهربائية الأخرى (المقاومة، السعة، الديود التي تعتبر عناصر غير فعالة).

ثنائي القطبية يحمل التيار بواسطة الإلكترونات و الثقوب معا عكس الترانزستور أحادي القطبية (unipolar) أين يكون التيار محمولا إما بالإلكترونات أو بالثقوب. اختصار إسم الترانزستور ثنائي القطبية بالانجليزية **BJT** وهي الأحرف الأولى لـ Bipolar Junction Transistor.

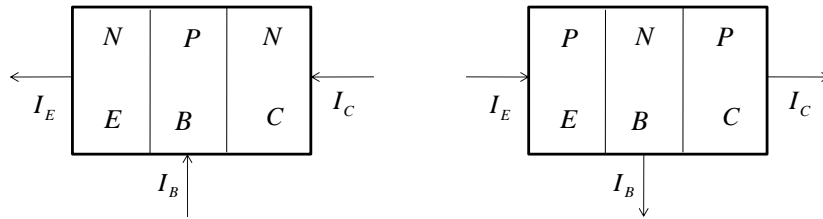
2.3 بنية BJT :

يتكون من وصلتين P-N مشتركتين في أحد أنواع نصف الناقل (P أو N) أي أن هناك نوعين من BJT : NPN أو PNP كما هو موضح في الشكل 1.3. يمكن اعتبار الترانزستور كعقدة (كهربائية) حيث ان التيار الداخل اليها يساوي التيار الخارج منها (قانون كيرشوف Kirchoff الذي ينص على ان المجموع الجبري في عقدة يكون معدوما).

في الترانزستور PNP التيار I_E داخلا بينما يكون كل من التيارين I_C و I_B خارجين والعكس بالنسبة للترانزستور NPN. وبالتالي فان تيار الباعث هو مجموع تياري المجمع و القاعدة في كل من النوعين من الترانزستور ثنائي القطبية

$$I_E = I_C + I_B$$

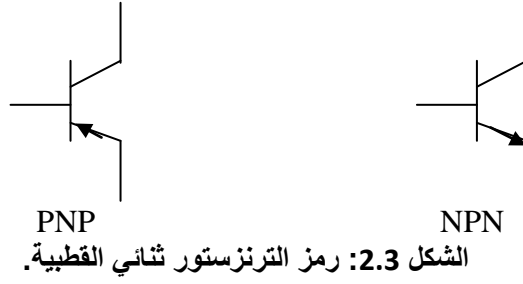
تسمى الجهة اليسرى بالباعث (Emitter E) ، الجهة اليمنى بالمجمع (Collector C) و بينهما القاعدة (Base B).



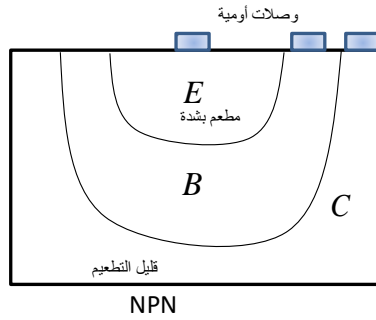
الشكل 1.3 بنية الترانزستور ثنائي القطبية

NPN هو الأكثر إستعمالا في التضخيم لأن تيار الإلكترونات هو الغالب (أسرع في التجاوب مع تغيرات الإشارة الكهربائية). أما PNP يستعمل كمكمل في الإستعمالات الرقمية (كقاطعة).

يرمز للـ BJT بالمخطط المبين في الشكل 2.3 حيث يوضع سهم في الباعث يبين ماذا كان الترانزستور من النوع NPN (سهم خارج) او من النوع PNP (سهم داخل):



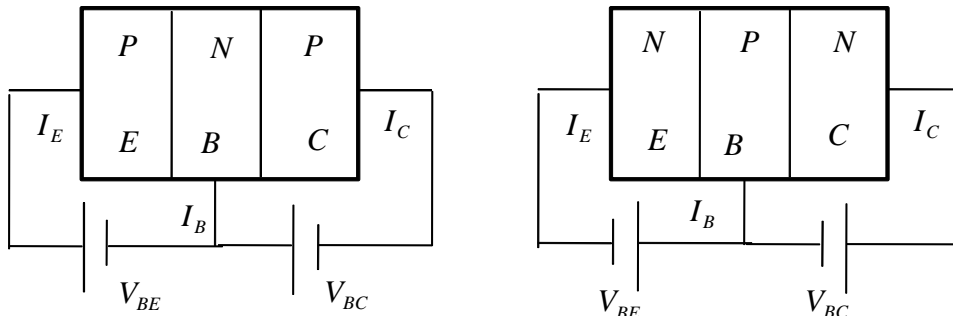
اما البنية الحقيقية لترانزستور ثنائي القطبية فهي موضحة في الشكل 3.3 حيث على مسند قليل التطعيم (يمثل المجمع) تطعم منطقة مختلفة (من النوع P اذا كان المسند من النوع N) بتطعيم مماثل في القيمة حيث تكون القاعدة ثم منطقة عالية التطعيم لتكون الباعث.



الشكل 3.3: البنية الحقيقية لترانزستور ثنائي القطبية.

3.3 مبدأ عمل BJT :

الوصلة باعث-قاعدة مستقطبة إستقطابا مباشرا أما الوصلة قاعدة-مجمع فهي مستقطبة عكسيا. بالنسبة لـ NPN : $V_{BE} > 0$ ، $V_{BC} < 0$. و بالنسبة PNP : $V_{BE} < 0$ ، $V_{BC} > 0$.



الشكل 4.3: استقطاب الترانزستور ثنائي القطبية

من الآن فصاعدا سوف ندرس فقط الترانزستور NPN . تطبق العلاقات على PNP بتغيير إشارة الجهد و التيار .

الإلكترونات المنبعثة من الباعث تصل إلى القاعدة حيث يمكن أن نحصل على ثلاث حالات :

- جزء منها يلتحم مع الثقوب.
- جزء منها يمكن أن تمر عبر القاعدة.
- جزء منها يمكن أن تصل إلى منطقة شحنات الفضاء بين القاعدة و المجمع حيث يوجد حقل كهربائي مرتفع (بسبب الاستقطاب العكسي لهذه الوصلة) يعمل على تسريعها نحو المجمع.

نقول عن ترانزيستور BJT أنه جيد إذا تجاوزت نسبة الإلكترونات المجمعة 99% . يمكن الحصول على هذه النسبة بالإختيار الجيد للقاعدة (تطعيم وسمك أقل ما يمكن كما سيتوضح ذلك لاحقاً).

4.3 التيارات في BJT :

تحسب التيارات (I_B, I_C, I_E) بدلالة V_{BE} و V_{BC} بنفس طريقة التيار في الوصلة $P - N$ ، اي نفس الفرضيات و ابتداء من معادلة الإستمرارية للثقوب في الباعث و المجمع و الإلكترونات في القاعدة. اي ان التيار ناتج عن الانتشار للحوامل الاقلية. أي أن معادلتى الإستمرارية للإلكترونات في المنطقة P و الثقوب في المنطقة N . في القاعدة:

$$D_n \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} - \frac{\Delta n}{\tau_n} = 0$$

اما في الباعث و المجمع:

$$D_p \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - \frac{\Delta p}{\tau_p} = 0$$

1.4.3 توزيع الحاملات الأقلية (الثقوب) في الباعث:

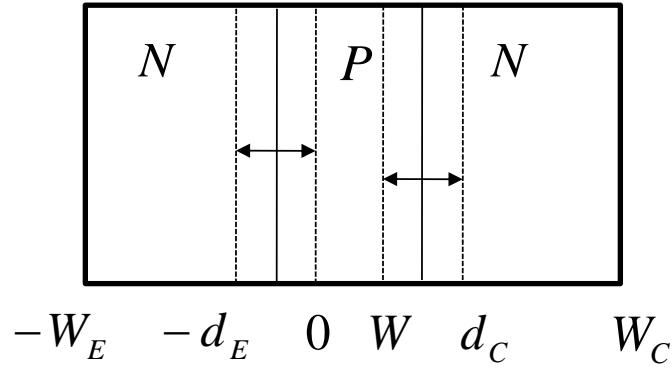
عرفنا في الوصلة $P - N$ ان حل المعادلة التفاضلية (معادلة الاستمرارية – المعادلات السابقة) يكون من الشكل:

$$\Delta P_E(x) = A e^{\frac{x}{L_p}} + B e^{-\frac{x}{L_p}} \quad 3.1$$

حيث ان ΔP_E الزيادة في تركيز الثقوب في الباعث بواسطة تطبيق فرق الجهد V_{BE} على الوصلة باعـث-قاعدة, L_p : طول انتشار الثقوب , x هي مسافة الانتشار و A و B ثابتين يمكن حسابهما من الشروط الحدودية.

الشروط الحدودية في الباعث:

لتسهيل الحساب نختار مبدأ الفواصل هو منطقة شحنات الفضاء بين الباعث و القاعدة (جهة القاعدة) كما هو واضح في الشكل 5.3. حيث ان



الشكل 5.3: الحدود في الترانزستور ثنائي القطبية

d_E : سمك منطقة شحنات الفضاء بين الباعث و القاعدة .

W : هو حد منطقة شحنات الفضاء بين القاعدة و المجمع.

$d_C - W$: سمك منطقة شحنات الفضاء بين القاعدة و المجمع.

$$\Delta p_E(-d_E) = \frac{n_i^2}{N_E} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \quad 3.2$$

$$\Delta p_E(-W_E) = 0 \quad 3.3$$

من المعادلة 2.3 نجد ان:

$$\Delta p_E(-d_E) = A e^{\frac{-d_E}{L_p}} + B e^{\frac{d_E}{L_p}} = \frac{n_i^2}{N_E} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \quad 3.4$$

من المعادلة 3.3 نجد ان:

$$\Delta p_E(-W_E) = A e^{\frac{-W_E}{L_p}} + B e^{\frac{W_E}{L_p}} = 0 \quad 3.5$$

من المعادلة 5.3 نجد ان:

$$A = -B e^{\frac{2W_E}{L_p}} \quad 3.6$$

نعوض في المعادلة 4.3 فنجد ان:

$$\begin{aligned} -B e^{\frac{2W_E}{L_p}} e^{\frac{-d_E}{L_p}} + B e^{\frac{d_E}{L_p}} &= \frac{n_i^2}{N_E} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \\ \Rightarrow B &= \frac{\frac{n_i^2}{N_E} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right)}{e^{\frac{d_E}{L_p}} - e^{\frac{2W_E - d_E}{L_p}}} = \frac{\frac{n_i^2}{N_E} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) e^{\frac{-W_E}{L_p}}}{e^{\frac{d_E - W_E}{L_p}} - e^{\frac{W_E - d_E}{L_p}}} \end{aligned}$$

$$B = \frac{n_i^2}{N_E} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \frac{e^{-\frac{W_E}{L_p}}}{2 \sinh \frac{d_E - W_E}{L_p}}, \quad 3.7$$

نعوض في المعادلة 3,6 فنجد ان:

$$A = -\frac{n_i^2}{N_E} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \frac{e^{\frac{W_E}{L_p}}}{2 \sinh \frac{d_E - W_E}{L_p}} \quad 3.8$$

بتعويض المعادلتين 7.3 و 8.3 (قيمة B و A) في المعادلة 1.3 نجد

$$\Delta P_E(x) = \frac{-\frac{n_i^2}{N_E} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right)}{2 \sinh \frac{d_E - W_E}{L_p}} \left(e^{\frac{x+W_E}{L_p}} - e^{-\frac{x-W_E}{L_p}} \right)$$

$$\Delta P_E(x) = \frac{n_i^2}{N_E} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \frac{\sinh \frac{x+W_E}{L_p}}{\sinh \frac{W_E - d_E}{L_p}} \quad 3.9$$

2.4.3 توزيع الإلكترونات في القاعدة :

يكون الحل في القاعدة من الشكل

$$\Delta n_B(x) = C e^{\frac{x}{L_n}} + D e^{-\frac{x}{L_n}} \quad 3.10$$

الشروط الحدودية في القاعدة :

$$\Delta n_B(0) = \frac{n_i^2}{N_B} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \quad 3.11$$

N_B هو تطعيم القاعدة (من نوع P).

$$\Delta n_B(W) = \frac{n_i^2}{N_B} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) \quad 3.12$$

بتعويض (3.11) في (3.10) نحصل على

$$\Delta n_B(0) = C + D = \frac{n_i^2}{N_B} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \quad 3.13$$

بتعويض (3.12) في (3.10) نحصل على

$$\Delta n_B(W) = C e^{\frac{W}{L_n}} + D e^{-\frac{W}{L_n}} = \frac{n_i^2}{N_B} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) \quad 3.14$$

$$C = \frac{n_i^2}{N_B} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) - D \quad 3.15$$

بتعويض (3.15) في (3.14) نحصل على

$$\left(\frac{n_i^2}{N_B} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) - D \right) e^{\frac{W}{L_n}} + D e^{-\frac{W}{L_n}} = \frac{n_i^2}{N_B} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right)$$

$$D = \frac{\frac{n_i^2}{N_B} \left(\left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) - e^{\frac{W}{L_n}} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \right)}{e^{-\frac{W}{L_n}} - e^{\frac{W}{L_n}}} = \frac{n_i^2 \left\{ e^{\frac{W}{L_n}} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) - \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) \right\}}{2 \sinh \frac{W}{L_n}} \quad 3.16$$

بتعويض (3.16) في (3.15) نحصل على

$$C = \frac{n_i^2}{N_B} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) - \frac{n_i^2 \left\{ e^{\frac{W}{L_n}} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) - \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) \right\}}{2 \sinh \frac{W}{L_n}}$$

$$= \frac{n_i^2}{N_B} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \left(1 - \frac{e^{\frac{W}{L_n}}}{2 \sinh \frac{W}{L_n}} \right) + \frac{\left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right)}{2 \sinh \frac{W}{L_n}}$$

$$C = \frac{n_i^2}{N_B 2 \sinh \frac{W}{L_n}} \left\{ -e^{-\frac{W}{L_n}} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) + \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) \right\} \quad 3.17$$

بتعويض (3.16) و (3.17) في (3.14) نحصل على

$$\Delta n_B(x) = C e^{\frac{x}{L_n}} + D e^{-\frac{x}{L_n}} = \frac{n_i^2}{N_B 2 \sinh \frac{W}{L_n}} \left\{ -e^{-\frac{W}{L_n}} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) + \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) \right\} e^{\frac{x}{L_n}} +$$

$$\frac{n_i^2}{N_B 2 \sinh \frac{W}{L_n}} \left\{ e^{\frac{W}{L_n}} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) - \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) \right\} e^{-\frac{x}{L_n}}$$

$$= \frac{n_i^2}{2 N_B \sinh \frac{W}{L_n}} \left\{ \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \left(e^{\frac{W-x}{L_n}} - e^{-\frac{W+x}{L_n}} \right) + \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) \left(e^{\frac{x}{L_n}} - e^{-\frac{x}{L_n}} \right) \right\}$$

$$\Delta n_B(x) = \frac{n_i^2}{N_B} \left\{ \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \frac{\sinh \left(\frac{W-x}{L_n} \right)}{\sinh \frac{W}{L_n}} + \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) \frac{\sinh \left(\frac{x}{L_n} \right)}{\sinh \frac{W}{L_n}} \right\}$$

$$\Delta n_B(x) = \frac{n_i^2}{N_B} \left\{ \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \frac{\sinh \left(\frac{W-x}{L_n} \right)}{\sinh \frac{W}{L_n}} \right\} \quad 3.18$$

3.4.3 توزيع الثقوب في المجمع :

إكون الحل من الشكل

$$\Delta P_C(x) = E e^{\frac{x}{L_p}} + F e^{-\frac{x}{L_p}} \quad 3.19$$

الشروط الحدودية في المجمع هي:

$$\Delta p_C(d_C) = \frac{n_i^2}{N_C} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) \quad 3.20$$

$$\Delta p_C(W_C) = 0 \quad 3.21$$

نعوض بـ $x = W_C$ في (3.19)؛ ونستعمل المعادلة (3.21) فنجد ان

$$\Delta P_C(W_C) = E e^{\frac{W_C}{L_p}} + F e^{-\frac{W_C}{L_p}} = 0$$

$$E e^{\frac{W_C}{L_p}} = -F e^{-\frac{W_C}{L_p}} \Rightarrow E = -F e^{-2\frac{W_C}{L_p}} \quad 3.22$$

نعوض بـ $x = d_C$ في (3.19)؛ ونستعمل المعادلة (3.20) ونعوض بقيمة E من (3.22) فنجد ان

$$-F e^{-2\frac{W_C}{L_p}} e^{\frac{d_C}{L_p}} + F e^{-\frac{d_C}{L_p}} = \frac{n_i^2}{N_C} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right)$$

نضرب طرفي المعادلة السابقة في $\frac{W_C}{L_p}$

$$\left(-F e^{-2\frac{W_C}{L_p}} e^{\frac{d_C}{L_p}} + F e^{-\frac{d_C}{L_p}} \right) e^{\frac{W_C}{L_p}} = \frac{n_i^2}{N_C} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) e^{\frac{W_C}{L_p}}$$

$$\left(-F e^{-\frac{W_C}{L_p}} e^{\frac{d_C}{L_p}} + F e^{-\frac{d_C}{L_p}} e^{\frac{W_C}{L_p}} \right) = \frac{n_i^2}{N_C} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) e^{\frac{W_C}{L_p}}$$

$$\left(-F e^{-\frac{W_C}{L_p}} e^{\frac{d_C}{L_p}} + F e^{-\frac{d_C}{L_p}} e^{\frac{W_C}{L_p}} \right) = \frac{n_i^2}{N_C} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) e^{\frac{W_C}{L_p}}$$

$$F 2 \sinh \left(\frac{W_C - d_C}{L_p} \right) = \frac{n_i^2}{N_C} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) e^{\frac{W_C}{L_p}}$$

$$F = \frac{\frac{n_i^2}{N_C} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) e^{\frac{W_C}{L_p}}}{2 \sinh \left(\frac{W_C - d_C}{L_p} \right)} \quad 3.23$$

و بالتالي فإن

$$E = -F e^{-\frac{W_C}{L_p}} = -\frac{\frac{n_i^2}{N_C} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) e^{\frac{W_C}{L_p}}}{2 \sinh\left(\frac{W_C - d_C}{L_p}\right)} e^{-\frac{W_C}{L_p}}$$

$$E = -\frac{\frac{n_i^2}{N_C} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) e^{-\frac{W_C}{L_p}}}{2 \sinh\left(\frac{W_C \pm}{L_p}\right)} \quad 3.24$$

بتعويض (3,23) و (3,24) في (3,19) نحصل على

$$\Delta P_C(x) = E e^{\frac{x}{L_p}} + F e^{-\frac{x}{L_p}} = -\frac{\frac{n_i^2}{N_C} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) e^{-\frac{W_C}{L_p}}}{2 \sinh\left(\frac{W_C - d_C}{L_p}\right)} e^{\frac{x}{L_p}} + \frac{\frac{n_i^2}{N_C} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) e^{\frac{W_C}{L_p}}}{2 \sinh\left(\frac{W_C - d_C}{L_p}\right)} e^{-\frac{x}{L_p}}$$

$$\Delta P_C(x) = \frac{\frac{n_i^2}{N_C} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right)}{2 \sinh\left(\frac{W_C - d_C}{L_p}\right)} \left(-e^{-\frac{W_C}{L_p}} e^{\frac{x}{L_p}} + e^{\frac{W_C}{L_p}} e^{-\frac{x}{L_p}} \right)$$

$$\Delta P_C(x) = \frac{\frac{n_i^2}{N_C} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right)}{2 \sinh\left(\frac{W_C - d_C}{L_p}\right)} \left(-e^{-\frac{W_C + x}{L_p}} + e^{\frac{W_C - x}{L_p}} \right) = \frac{\frac{n_i^2}{N_C} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right)}{2 \sinh\left(\frac{W_C - d_C}{L_p}\right)} 2 \sinh\left(\frac{W_C - x}{L_p}\right)$$

$$\Delta P_C(x) = \frac{n_i^2}{N_C} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) \frac{\sinh\frac{W_C - x}{L_p}}{\sinh\frac{W_C - d_C}{L_p}} \quad 3.25$$

4.4.3 تيار الباعث :

كما رأينا في الوصلة P-N فإن التيار هو مجموع تيارى الإلكترونات و الثقوب عند حدود منطقة شحنات الفضاء. في حالة تيار الباعث فإن تيار الإلكترونات عند حد منطقة شحنات الفضاء جهة القاعدة للوصلة بين الباعث و القاعدة ($x = 0$) بينما تيار الثقوب عند حد منطقة شحنات الفضاء جهة الباعث للوصلة بين الباعث و القاعدة ($x = -d_E$) أي أن:

$$I_E = -S \cdot q \cdot D_p \frac{d\Delta p_E(x)}{dx} \Big|_{x=-d_E} + S \cdot q \cdot D_n \frac{d\Delta n_B(x)}{dx} \Big|_{x=0} \quad 3.26$$

$$\frac{d\Delta p_E(x)}{dx} \Big|_{x=-d_E} = \frac{n_i^2}{N_E} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \frac{d}{dx} \left(\frac{\sinh\frac{x+W_E}{L_p}}{\sinh\frac{W_E-d_E}{L_p}} \right) \Big|_{x=-d_E} = \frac{n_i^2}{N_E L_p} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \frac{\cosh\frac{-d_E+W_E}{L_p}}{\sinh\frac{W_E-d_E}{L_p}}$$

$$\frac{d\Delta p_E(x)}{dx} \Big|_{x=-d_E} = \frac{n_i^2}{N_E L_p} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \text{Cotgh}\left(\frac{W_E - d_E}{L_p}\right) \quad 3.27$$

من المعادلة (3.18)

$$\left. \frac{d\Delta n_B(x)}{dx} \right|_{x=0} = \frac{d}{dx} \left(\frac{n_i^2}{N_B} \left\{ \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \frac{\sinh\left(\frac{W-x}{L_n}\right)}{\sinh\frac{W}{L_n}} + \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) \frac{\sinh\left(\frac{x}{L_n}\right)}{\sinh\frac{W}{L_n}} \right\} \right) \Bigg|_{x=0}$$

$$\left. \frac{d\Delta n_B(x)}{dx} \right|_{x=0} = \frac{d}{dx} \left(\frac{n_i^2}{N_B} \left\{ \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \frac{\sinh\left(\frac{W-x}{L_n}\right)}{\sinh\frac{W}{L_n}} \right\} \right) \Bigg|_{x=0}$$

$$\left. \frac{d\Delta n_B(x)}{dx} \right|_{x=0} = \frac{n_i^2}{N_B L_n} \left\{ - \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \frac{\cosh\left(\frac{W-x}{L_n}\right)}{\sinh\frac{W}{L_n}} + \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) \frac{\cosh\left(\frac{x}{L_n}\right)}{\sinh\frac{W}{L_n}} \right\} \Bigg|_{x=0}$$

$$\left. \frac{d\Delta n_B(x)}{dx} \right|_{x=0} = \frac{n_i^2}{N_B L_n} \left\{ - \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \text{Cotgh}\frac{W}{L_n} + \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) \frac{\cosh\left(\frac{0}{L_n}\right)}{\sinh\frac{W}{L_n}} \right\}$$

$$\left. \frac{d\Delta n_B(x)}{dx} \right|_{x=0} = \frac{n_i^2}{N_B L_n} \left\{ - \underbrace{\left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \text{Cotgh}\frac{W}{L_n}}_{\text{مباشر}} + \underbrace{\left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right)}_{\text{عكسي}} \right\}$$

بما أن الوصلة باعث-قاعدة مستقطبة استقطابا مباشرا بينما الوصلة مجمع-قاعدة مستقطبة استقطابا عكسيا فإن الحد الثاني يكون مهملا و بالتالي:

$$\left. \frac{d\Delta n_B(x)}{dx} \right|_{x=0} \approx \frac{n_i^2}{N_B L_n} \left\{ - \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \text{Cotgh}\frac{W}{L_n} \right\} \quad 3.28$$

بتعويض (3,28) و (3,27) في (3,26) نجد أن:

$$I_E = -S \cdot q \cdot D_p \frac{n_i^2}{N_E L_p} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \text{Cotgh}\left(\frac{W_E - d_E}{L_p}\right) - S \cdot q \cdot D_n \frac{n_i^2}{N_B L_n} \left\{ \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \text{Cotgh}\frac{W}{L_n} \right\}$$

$$I_E = -S \cdot q \cdot n_i^2 \left\{ \frac{D_p}{N_E L_p} \text{Cotgh}\left(\frac{W_E - d_E}{L_p}\right) + \frac{D_n}{N_B L_n} \text{Cotgh}\frac{W}{L_n} \right\} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right)$$

لأن الإستقطاب مباشر فإن $d_E \ll W_E$

$$I_E = -S \cdot q \cdot n_i^2 \left\{ \frac{D_p}{N_E L_p} \text{Cotgh}\left(\frac{W_E}{L_p}\right) + \frac{D_n}{N_B L_n} \text{Cotgh}\frac{W}{L_n} \right\} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \quad 3.29a$$

الإشارة (-) ربما تدل على أن تيار الباعث عكس الاتجاه الموجب لـ (x). و لذلك فإن أغلب الكتب في هذا المجال تعتبر القيمة المطلقة لـ I_E . من جهة أخرى فإن أبعاد الترانزستور (W و W_E) تكون أصغر من أطوال انتشار الحاملات (L_p و L_n)

(L_n) أي أن $\frac{L_p}{W_E} \approx \frac{L_p}{W_E}$ و $\text{Cotgh}\left(\frac{W_E}{L_p}\right) = \frac{\cosh\left(\frac{W_E}{L_p}\right)}{\sinh\left(\frac{W_E}{L_p}\right)} \approx \frac{1}{\frac{W_E}{L_p}} \approx \frac{L_p}{W_E}$ عندئذ تبسط المعادلة (3.29a) إلى:

$$|I_E| = S \cdot q \cdot n_i^2 \left\{ \frac{D_p}{N_E L_p} \frac{L_p}{W_E} + \frac{D_n}{N_B L_n} \frac{L_n}{W} \right\} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right)$$

$$|I_E| = S \cdot q \cdot n_i^2 \left\{ \frac{D_p}{N_E W_E} + \frac{D_n}{N_B W} \right\} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \quad 3.29b$$

5.4.3 تيار المجمع:

$$I_C = I_{CN} + I_{CP} = S \cdot q \cdot D_n \frac{d\Delta n_B(x)}{dx} \Big|_{x=W} - S \cdot q \cdot D_p \frac{d\Delta p_C(x)}{dx} \Big|_{x=d_C} \quad 3.30$$

$$I_C = S \cdot q \cdot D_n \frac{d\Delta n_B(x)}{dx} \Big|_{x=W} - S \cdot q \cdot D_p \frac{d\Delta p_C(x)}{dx} \Big|_{x=d_C}$$

$$\frac{d\Delta n_B(x)}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\frac{n_i^2}{N_B} \left\{ \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \frac{\sinh\left(\frac{W-x}{L_n}\right)}{\sinh\frac{W}{L_n}} + \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) \frac{\sinh\left(\frac{x}{L_n}\right)}{\sinh\frac{W}{L_n}} \right\} \right)$$

$$\frac{d\Delta n_B(x)}{dx} = \frac{n_i^2}{N_B} \left\{ \frac{-1}{L_n} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \frac{\cosh\left(\frac{W-x}{L_n}\right)}{\sinh\frac{W}{L_n}} + \frac{1}{L_n} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) \frac{\cosh\left(\frac{x}{L_n}\right)}{\sinh\frac{W}{L_n}} \right\}$$

لدينا $\left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) \ll \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right)$ لأن $V_{BC} < 0$ بينما $V_{BE} > 0$

$$\frac{d\Delta n_B(x)}{dx} \approx -\frac{n_i^2}{N_B L_n} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \frac{\cosh\left(\frac{W-x}{L_n}\right)}{\sinh\frac{W}{L_n}}$$

$$\frac{d\Delta n_B(x)}{dx} \Big|_{x=W} \approx -\frac{n_i^2}{N_B L_n} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \frac{1}{\sinh\frac{W}{L_n}}$$

لدينا $\sinh\frac{W}{L_n} \approx \frac{W}{L_n}$ لأن $W \ll L_n$

$$\frac{d\Delta n_B(x)}{dx} \Big|_{x=W} \approx -\frac{n_i^2}{N_B L_n} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \frac{1}{\frac{W}{L_n}}$$

$$\left. \frac{d\Delta n_B(x)}{dx} \right|_{x=W} \approx -\frac{n_i^2}{N_{BW}} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \quad 3.30$$

$$\frac{d\Delta p_C(x)}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\frac{n_i^2}{N_C} \left(e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} - 1 \right) \frac{\sinh \frac{W_C - x}{L_p}}{\sinh \frac{W_C - d_C}{L_p}} \right)$$

نلاحظ أن هذا الحد يحتوي على V_{BC} وبالتالي مهملاً فلا داعي لحسابه

$$I_C \approx I_{CN} = -S \cdot q \cdot n_i^2 \frac{D_n}{N_B L_n} \left\{ \frac{\left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right)}{\sinh \frac{W}{L_n}} \right\}$$

$$I_C \approx I_{CN} = -S \cdot q \cdot n_i^2 \frac{D_n}{N_B L_n} \left\{ \frac{\left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right)}{\frac{W}{L_n}} \right\}$$

$$\boxed{|I_C| = S \cdot q \cdot n_i^2 \frac{D_n}{N_{BW}} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right)} \quad 3.31$$

6.4.3 تيار القاعدة :

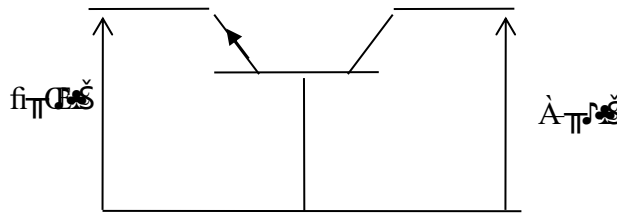
$$I_B = I_E - I_C = S \cdot q \cdot n_i^2 \left\{ \frac{D_p}{N_E W_E} + \frac{D_n}{N_{BW}} - \frac{D_n}{N_{BW}} \right\} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right)$$

$$\boxed{I_B = S \cdot q \cdot n_i^2 \frac{D_p}{N_E W_E} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right)} \quad 3.32$$

5.3 تضخيم التيار :

حسب نوع الترانزيستور لدينا نوعين من التضخيم:

1.5.3 تضخيم القاعدة المشتركة : في هذه الحالة تكون القاعدة مشتركة بين المدخل والمخرج.



الشكل 4.3

تضخيم القاعدة المشتركة يعطى بـ:

$$\alpha = \frac{I_C(\text{المخرج})}{I_E(\text{المدخل})} = \frac{\frac{D_n}{N_B L_n \sinh \frac{W}{L_n}}}{\left\{ \frac{D_p}{N_E L_p} \text{Cotgh} \left(\frac{W_E}{L_p} \right) + \frac{D_n}{N_B L_n} \text{Cotgh} \left(\frac{W}{L_n} \right) \right\}} = \frac{1}{\left\{ \frac{D_p N_B L_n \sinh \frac{W}{L_n}}{D_n N_E L_p \text{tgh} \left(\frac{W_E}{L_p} \right)} + \text{Cosh} \frac{W}{L_n} \right\}}$$

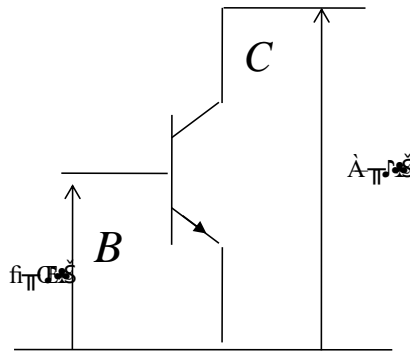
لدينا $x \approx \text{tgh}(x) \approx \sinh x$ و $\text{Cotgh}(x) \approx \frac{1}{x}$ و $\cosh(x) \approx 1$ عندما $x \ll 1$ و بالتالي

$$\alpha = \frac{1}{\left\{ \frac{D_p N_B L_n \frac{W}{L_n}}{D_n N_E L_p \left(\frac{W_E}{L_p} \right)} + 1 \right\}} = \frac{1}{\left\{ \frac{D_p N_B W}{D_n N_E W_E} + 1 \right\}}$$

$$\alpha = \frac{1}{\left\{ \frac{D_p N_B W}{D_n N_E W_E} + 1 \right\}} \quad 3.33$$

2.5.3 تضخيم الباعث المشترك :

الباعث مشترك بين المدخل و المخرج.



الشكل. 5.3

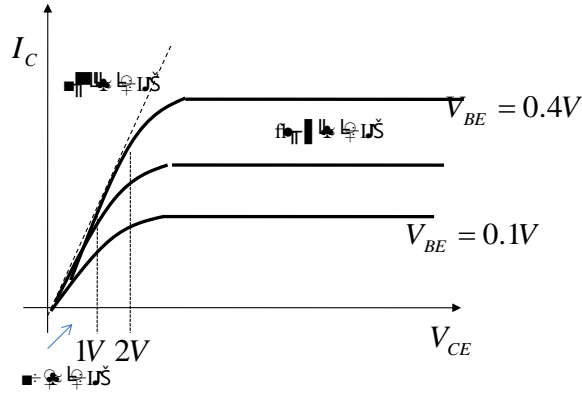
التضخيم :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_C}{I_E - I_C} = \frac{1}{\frac{I_E}{I_C} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} - 1} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$$\beta = \frac{1}{\left\{1 + \frac{D_p N_B W}{D_n N_E W_E}\right\}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{\left\{1 + \frac{D N_B W}{D N_E W_E}\right\}}}$$

$$\beta = \frac{D_n N_E W_E}{D_p N_B W} \quad 3.34$$

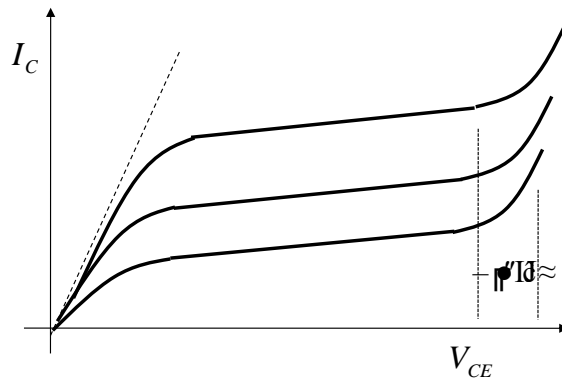
6.3 خصائص التيار :



الشكل 6.3

لإستعمال الترونزيستور في التضخيم يجب أن يشغل في منطقة التضخيم و لإستعماله كقاطعة يشغل في منطقتي القطع و التشبع.

الخصائص الحقيقية:



الشكل 7.3

تغير I_C مع V_{CE} ناتج عن تيار التوليد أو ما يسمى بمفعول إيرلي (Early) و هو تناقص سمك القاعدة و بالتالي يزداد التيار.