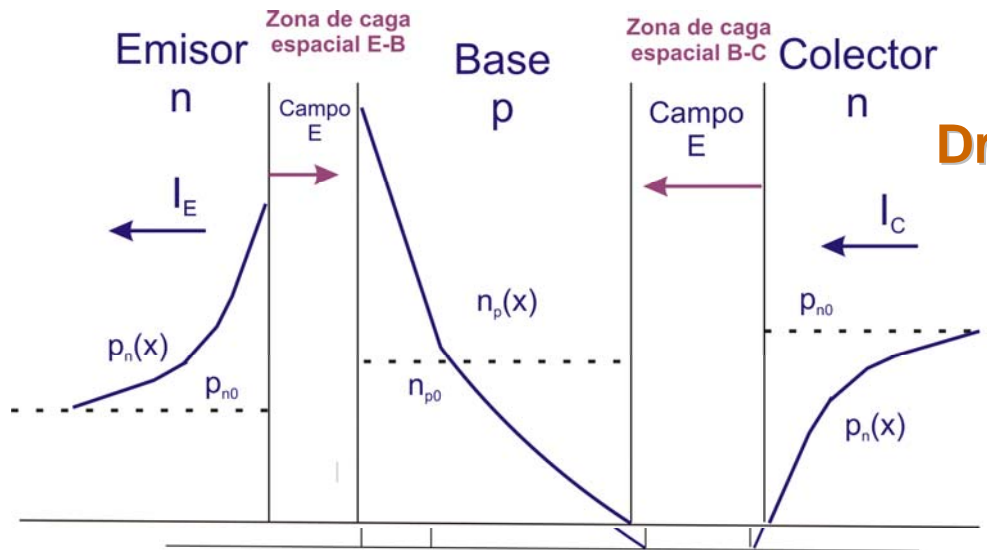




Transistor Bipolar



Dr. Andres Ozols

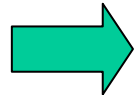
FIUBA

2007

Diodo = 1 juntura (pn) Dispositivo pasivo

Transistor Bipolar = 2 junturas (np + pn)

Dispositivo activo



1. **Ganancia de tensión**
2. **Control de la ganancia de corriente**
3. **Ganancia de potencia de la señal**

Tipos de Transistores

1. **Transistor Bipolar**
2. **MOSFET Transistor de Efecto de Campo
Semiconductor Óxido Metal**
3. **JFET Transistor de Efecto de Campo de Juntura**

Transistor Bipolar **La fuente de corriente controlada por tensión**

Objetivo: determinación de los factores de ganancia de corriente

ACCIÓN del TRANSISTOR BIPOLAR

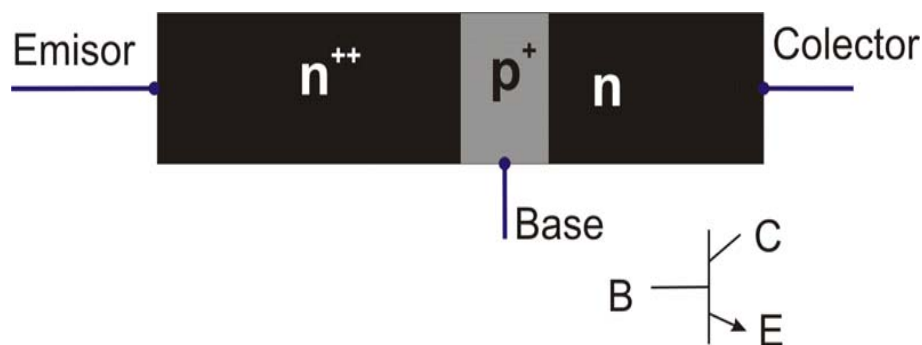
Transistor Bipolar La fuente de corriente controlada por tensión

Objetivo: determinación de los factores de ganancia de corriente

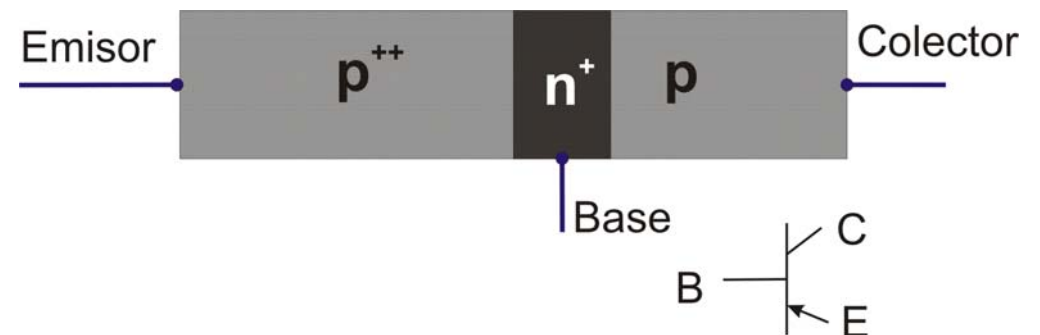
Principio Básico de Operación

Diagrama de bloques y símbolos

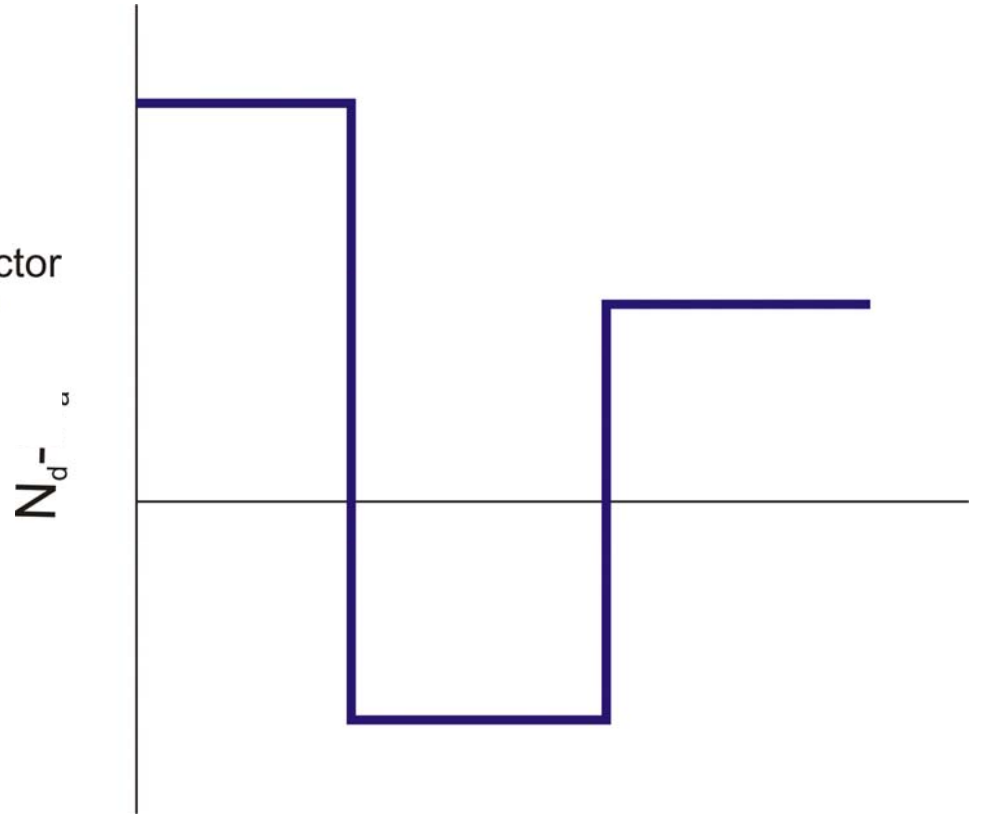
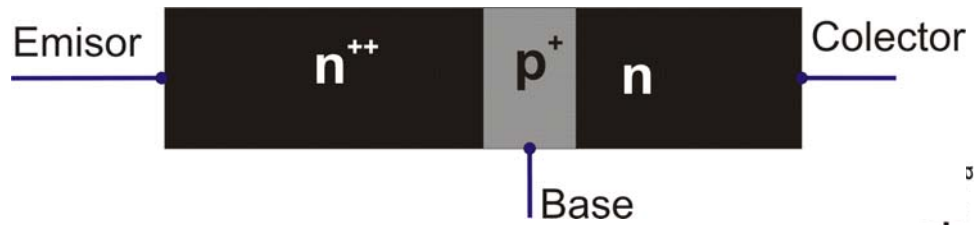
Transistor npn



Transistor pnp



Principio Básico de Operación



Modo de operación activa-directa

- *La juntura pn base-emisor (B-E) es polarizada en directa*
- *La juntura pn base-emisor (B-C) es polarizada en inversa*

Modo de operación activa-directa

(B-E) en directa



Electrones inyectados desde emisor a través de la juntura B-E en la base



Creación de exceso de minoritarios en la base

(B-C) en inversa



La concentración de electrones en el borde B-C es nula

Modo de operación activa-directa

El gradiente elevado de electrones



Los electrones inyectados desde el emisor difunden a través de la base hacia la juntura B-C

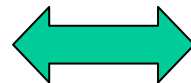
El campo eléctrico acelera a los electrones hacia del colector



La región de la base tiene que ser lo más fina posible para permitir el mayor número de electrones en el colector, evitando la recombinación



La concentración de electrones minoritarios es función de las tensiones B-E y B-C



Las junturas B-E y B-C son inter-actantes

Modo de operación activa-directa

Inyección y colección de electrones en modo directo activo

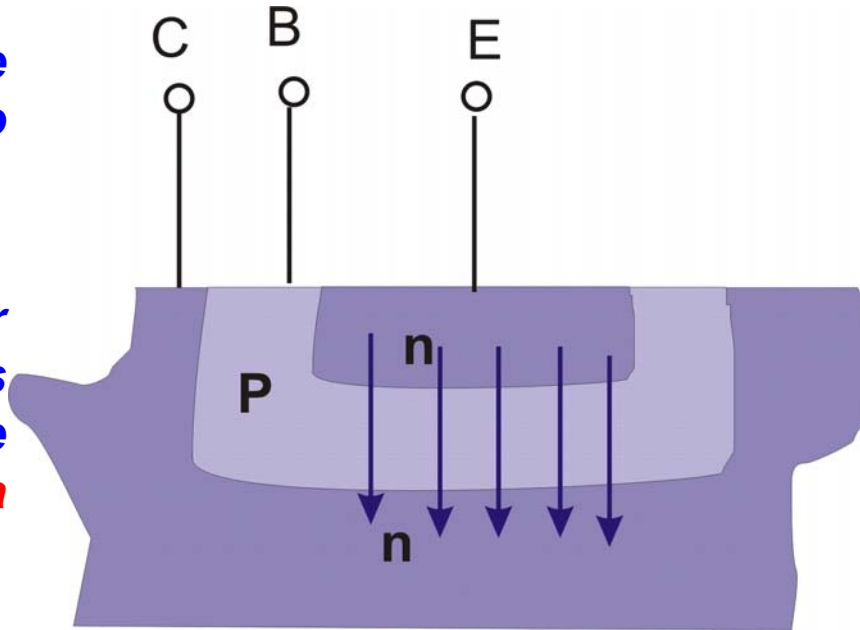
Número de electrones por unidad de tiempo es proporcional al número de electrones inyectado en la base

Número de electrones inyectados es función de la tensión B-E y casi independiente del potencial inverso B-C

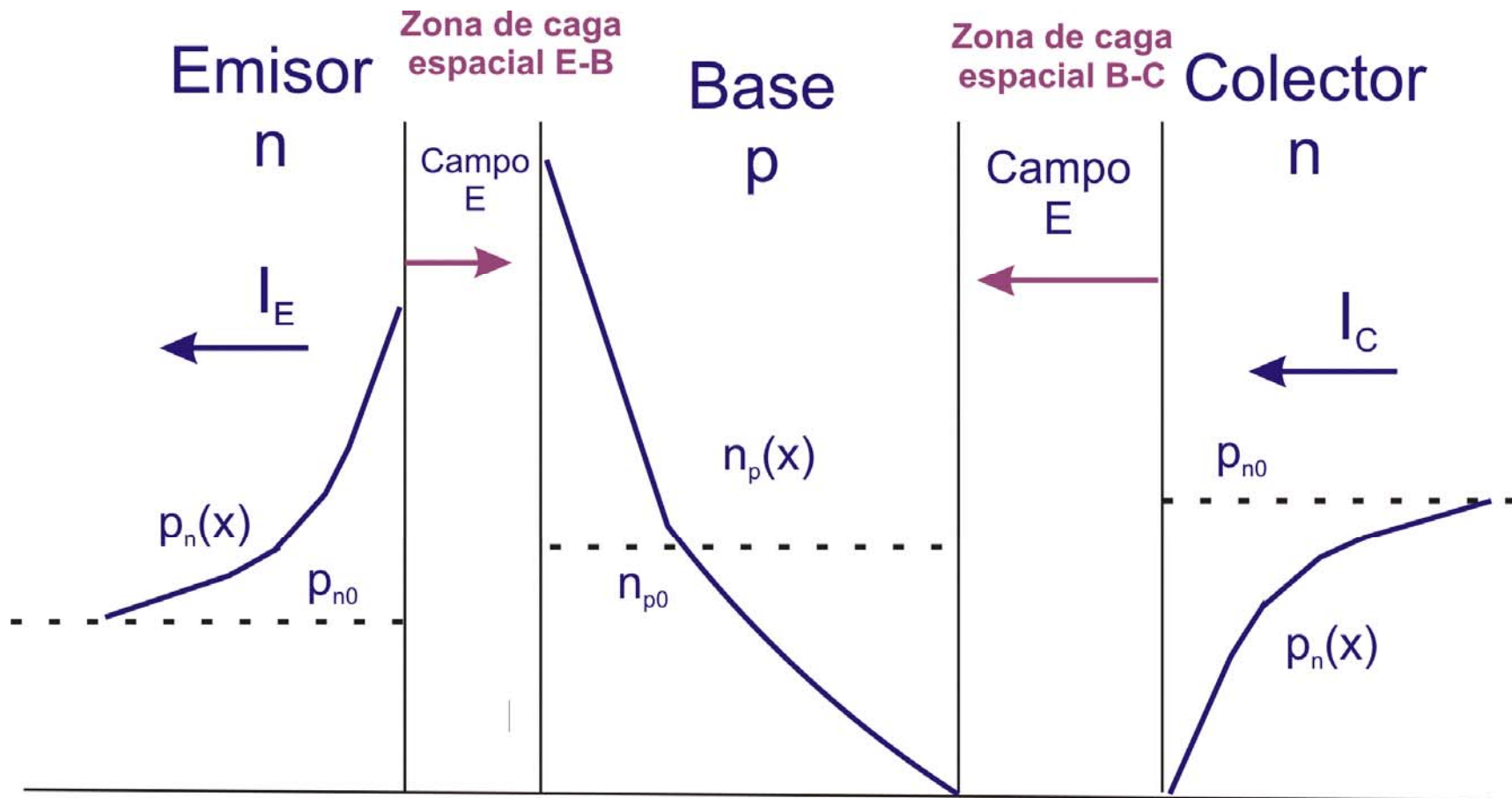
Acción del transistor

Los huecos son inyectados desde la base hacia el emisor

Control de la corriente de colector por medio de la tensión BE



Principio Básico de Operación en modo directo activo



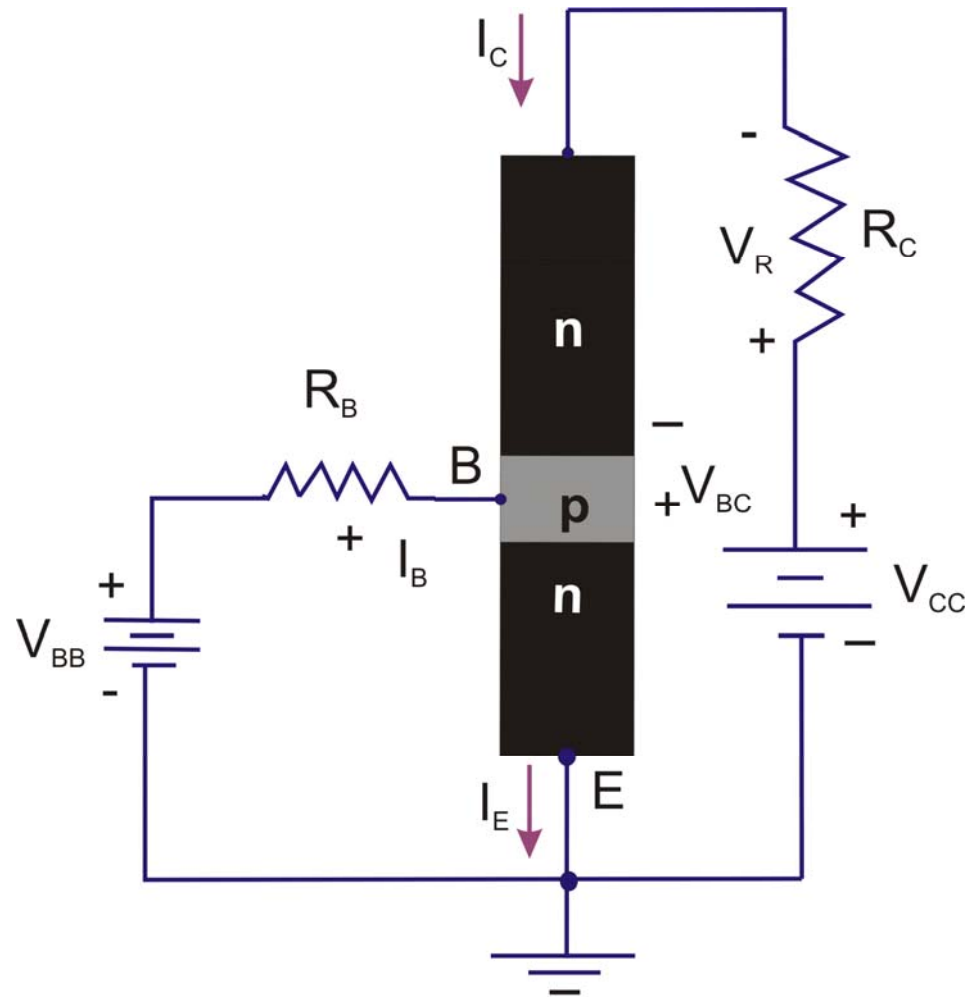
Modos de Operación

El transistor puede polarizarse en tres modos de operación

1- Modo de corte: $V_{BE} \leq 0$ los electrones mayoritarios del emisor no son inyectados a la base y la juntura B-C está en inversa.

Las corrientes de emisor colector son nulas.

Modos de emisor común



Modos de Operación

2- Modo activo directo: $V_{BE} > 0$ los electrones mayoritarios del emisor son inyectados en la base y la juntura B-C está en inversa.

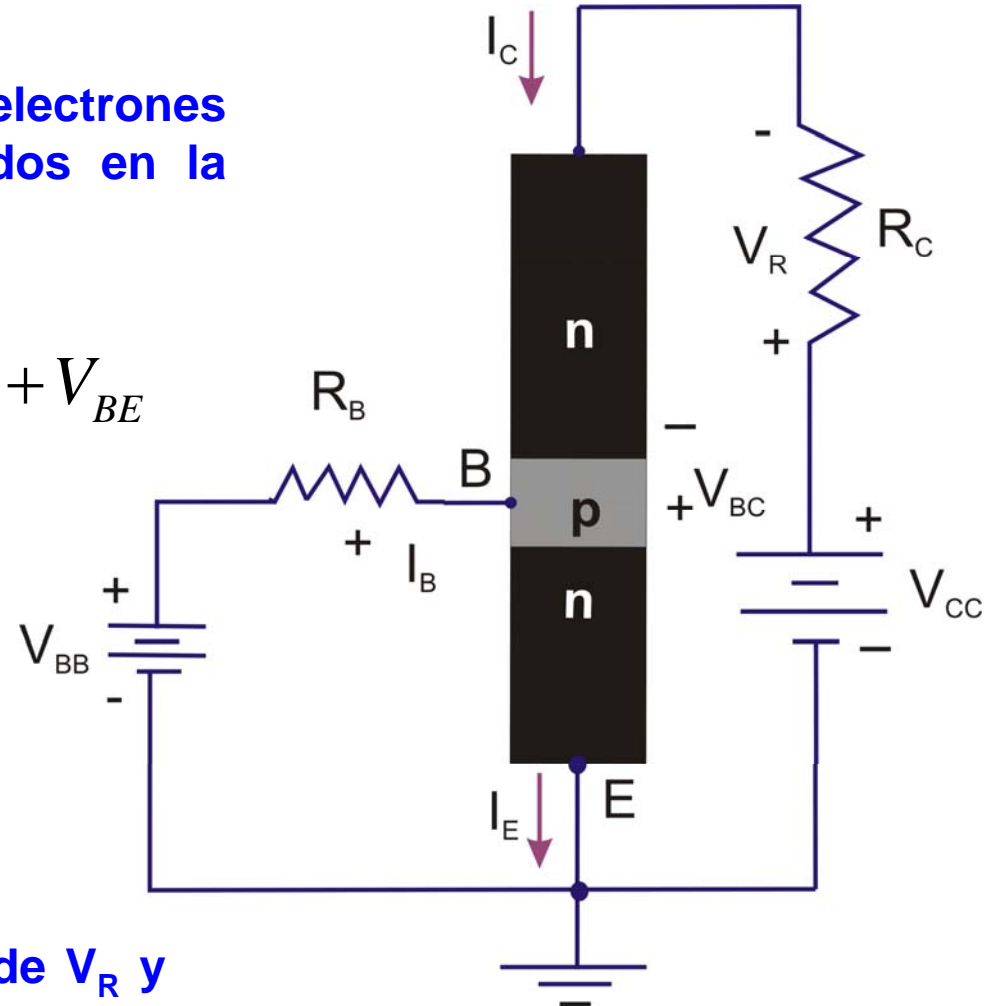
$$V_{CC} = I_C R_C - V_{BC} + V_{BE} = V_R - V_{BC} + V_{BE}$$

Si V_{BE} crece

↻ La corriente I_C y V_R crecen

↻ La magnitud de V_{BC} disminuye

↻ La combinación de V_R y V_{CC} hace $V_{BC}=0$



Modos de Operación

3- Modo de saturación: Un pequeño incremento de I_C produce la polarización directa $V_{BC} > 0$ como también BE



I_C deja de estar controlada V_{BE}

4- Modo activo inverso: La juntura B-E está polarizada en inversa mientras que la B-C en directa

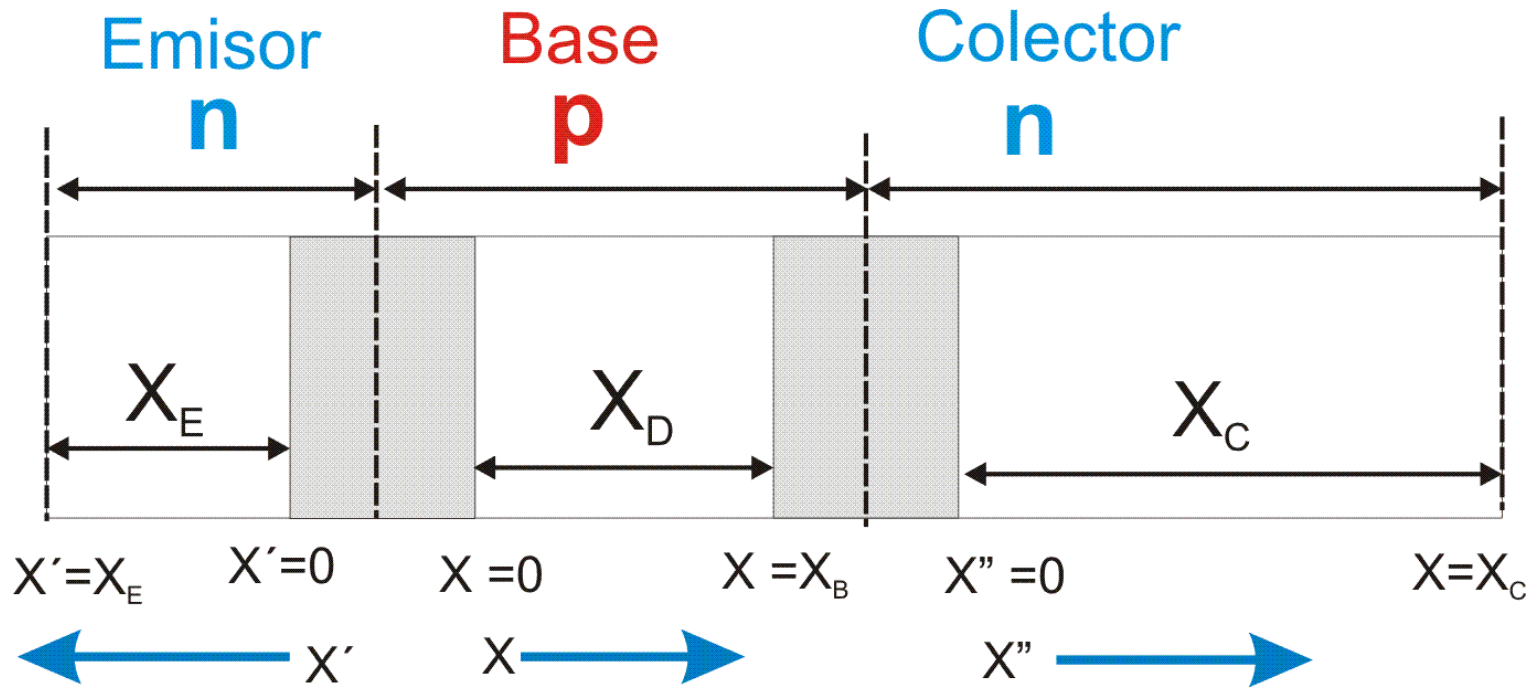


Los papeles del colector y emisor están invertidos pero con magnitudes distintas

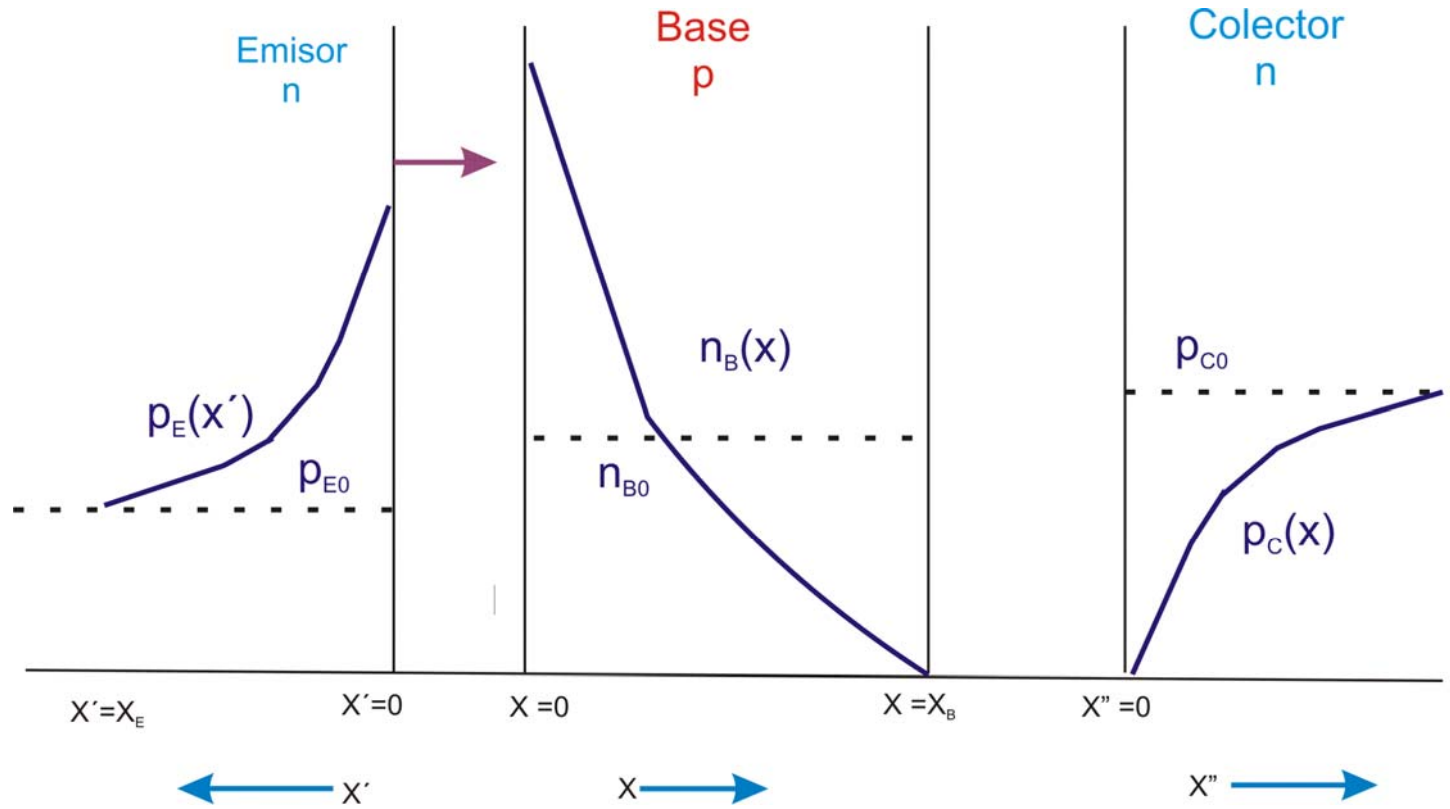
DISTRIBUCIÓN de PORTADORES MINORITARIOS

Notación**Definición****Para transistores NPN y PNP** N_E, N_B, N_C *Concentraciones de dopaje en las regiones de emisor, base y colector* X_E, X_B, X_C *Ancho de las zonas de vaciamiento de carga de las regiones de emisor, base y colector* D_E, D_B, D_C *Coefficientes de difusión de portadores minoritarios en las regiones de emisor, base y colector* $\tau_{E0}, \tau_{B0}, \tau_{C0}$ *Tiempos de vida de portadores minoritarios en las regiones de emisor, base y colector***Para NPN** P_{E0}, n_{B0}, P_{C0} *Concentraciones de portadores minoritarios en las regiones de emisor, base y colector* $P_E(x'), n_B(x'), P_C(x')$ *Concentraciones total de portadores minoritarios en las regiones de emisor, base y colector* $\delta P_E(x'), \delta n_B(x'), \delta P_C(x')$ *Concentraciones de exceso de portadores minoritarios en las regiones de emisor, base y colector***Para PNP** n_{E0}, P_{B0}, n_{C0} *Concentraciones de portadores minoritarios en las regiones de emisor, base y colector* $n_E(x'), P_B(x'), n_C(x')$ *Concentraciones total de portadores minoritarios en las regiones de emisor, base y colector* $\delta n_E(x'), \delta P_B(x'), \delta n_C(x')$ *Concentraciones de exceso de portadores minoritarios en las regiones de emisor, base y colector*

Modo Activo-Directo



Modo Activo-Directo



Modo Activo-Directo

Región de la base

La ecuación ambipolar en ausencia de campo eléctrico y en la situación estacionaria

$$D_B \frac{\partial^2 (\delta n_B(x))}{\partial x^2} - \frac{\delta n_B(x)}{\tau_{B0}} = 0$$

La concentración en exceso

$$\delta n_B(x) = n_B(x) - n_{B0}$$

La solución general

$$\delta n_B(x) = Ae^{x/L_B} + Be^{-x/L_B}$$

Donde L_B es longitud de difusión del portador minoritario

$$L_B = \sqrt{D_B \tau_{B0}}$$

Modo Activo-Directo

Región de la base

Las condiciones de contorno

$$\left| \begin{array}{l} \delta n_B (x = 0) = \delta n_B (0) = A + B \\ \delta n_B (x = x_B) = \delta n_B (x_B) = Ae^{x_B/L_B} + Be^{-x_B/L_B} \end{array} \right.$$

La juntura BE está polarizada en directo de modo que

$$\delta n_B (0) = n_{B0} \left[e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right]$$

La juntura BC está polarizada en inversa de modo que

$$\delta n_B (x_B) = n_B (x_B) - n_{B0} = 0 - n_{B0} = -n_{B0}$$

Modo Activo-Directo

Región de la base

$$\begin{aligned} \delta n_B(0) &= n_{B0} \left[e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right] = A + B \\ \delta n_B(x_B) &= -n_{B0} = Ae^{x_B/L_B} + Be^{-x_B/L_B} \end{aligned} \quad \left| \begin{array}{l} \rightarrow B = n_{B0} \left[e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right] - A \end{array} \right.$$

$$-n_{B0} = Ae^{x_B/L_B} + \left(n_{B0} \left[e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right] - A \right) e^{-x_B/L_B}$$

$$-n_{B0} = A \left(e^{x_B/L_B} - e^{-x_B/L_B} \right) + n_{B0} \left[e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right] e^{-x_B/L_B}$$

Modo Activo-Directo

Región de la base

$$-n_{B0} - n_{B0} \left[e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right] e^{-x_B/L_B} = 2A \operatorname{senh} \left(\frac{x_B}{L_B} \right)$$

$$-n_{B0} \frac{1 + \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) e^{-x_B/L_B}}{2 \operatorname{senh} \left(\frac{x_B}{L_B} \right)} = A$$

$$A = \frac{-n_{B0} - n_{B0} \left[e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right] e^{-x_B/L_B}}{2 \operatorname{senh} \left(\frac{x_B}{L_B} \right)}$$

Modo Activo-Directo

Región de la base

$$B = n_{B0} \left[e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right] + \frac{n_{B0} + n_{B0} \left[e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right] e^{-x_B/L_B}}{2\sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)}$$

$$B = \frac{n_{B0} \left[e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right] e^{x_B/L_B} + n_{B0}}{2\sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)}$$

Modo Activo-Directo

Región de la base

La solución será

$$\delta n_B(x) = \frac{-n_{B0} - n_{B0} \left[e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right] e^{-x_B/L_B}}{2 \sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} e^{x/L_B} + \frac{n_{B0} \left[e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right] e^{x_B/L_B} + n_{B0}}{2 \sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} e^{-x/L_B}$$

La solución será

$$\delta n_B(x) = n_{B0} \frac{\left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) \sinh\left(\frac{x_B - x}{L_B}\right) - \sinh\left(\frac{x}{L_B}\right)}{\sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)}$$

Modo Activo-Directo

Región de la base

La **solución** aproximada para $x_B < L_B$ $\sinh\left(\frac{x}{L_B}\right) \cong \frac{x}{L_B}$

$$\delta n_B(x) = n_{B0} \frac{\left(e^{eV_{BE}/kT} - 1\right) \frac{x_B - x}{L_B} - \frac{x}{L_B}}{\frac{x_B}{L_B}} = \frac{n_{B0}}{x_B} \left[\left(e^{eV_{BE}/kT} - 1\right) (x_B - x) - x \right]$$

Modo Activo-Directo

Región del Emisor

La ecuación ambipolar en ausencia de campo eléctrico y en la situación estacionaria

$$D_E \frac{\partial^2 (\delta p_E(x))}{\partial x^2} - \frac{\delta p_E(x)}{\tau_{E0}} = 0$$

La concentración en exceso

$$\delta p_E(x) = n_E(x) - n_{E0}$$

La solución general

$$\delta p_E(x') = C e^{x'/L_E} + D e^{-x'/L_E} \quad L_E = \sqrt{D_E \tau_{E0}}$$

Donde L_E es longitud de difusión del portador minoritario en la región del emisor

Modo Activo-Directo

Región del Emisor

El exceso de los huecos minoritarios tienen las condiciones de contorno

$$\left| \begin{array}{l} \delta p_E (x \geq 0) \equiv \delta p_E (0) = C + D \\ \delta p_E (x' = x_E) = \delta p_E (x_E) = C e^{x_E/L_E} + D e^{-x_E/L_E} \end{array} \right.$$

La juntura BE está polarizada en directo de modo que

$$\delta p_E (0) = p_E (x' = 0) - p_{E0} = p_{E0} \left[e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right]$$

En cambio, la alta velocidad de recombinación superficial en $X' = X_E$.

$$\delta p_E (x_E) = 0$$

Modo Activo-Directo

Región del Emisor

$$\left| \begin{array}{l} \delta p_E(0) = C + D = p_{E0} \left[e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right] \\ \delta p_E(x_E) = 0 = C e^{x_E/L_E} + D e^{-x_E/L_E} \end{array} \right. \Rightarrow D = p_{E0} \left[e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right] - C$$

$$0 = C e^{x_E/L_E} + \left[p_{E0} \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) - C \right] e^{-x_E/L_E}$$

$$0 = C \left(e^{x_E/L_E} - e^{-x_E/L_E} \right) + p_{E0} \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) e^{-x_E/L_E}$$

$$0 = 2C \operatorname{senh} \left(\frac{x_E}{L_E} \right) + p_{E0} \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) e^{-x_E/L_E} \quad C = \frac{p_{E0} \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) e^{-x_E/L_E}}{2 \operatorname{senh} \left(\frac{x_E}{L_E} \right)}$$

Modo Activo-Directo

Región del Emisor

$$D = p_{E0} \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) \frac{p_{E0} \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) e^{-x_E/L_E}}{2 \operatorname{senh} \left(\frac{x_E}{L_E} \right)}$$

$$D = p_{E0} \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) \left(1 - \frac{e^{-x_E/L_E}}{2 \operatorname{senh} \left(\frac{x_E}{L_E} \right)} \right)$$

Modo Activo-Directo

Región del Emisor

$$\delta p_E(x') = \frac{p_{E0} \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) e^{-x_E/L_E}}{2 \sinh \left(\frac{x_E}{L_E} \right)} e^{x'/L_E} + p_{E0} \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) \left(1 - \frac{e^{-x_E/L_E}}{2 \sinh \left(\frac{x_E}{L_E} \right)} \right) e^{-x'/L_E}$$

$$\delta p_E(x') = \frac{p_{E0} \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) e^{-x_E/L_E}}{2 \sinh \left(\frac{x_E}{L_E} \right)} e^{x'/L_E} + p_{E0} \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) \left(1 - \frac{e^{-x_E/L_E}}{2 \sinh \left(\frac{x_E}{L_E} \right)} \right) e^{-x'/L_E}$$

$$\delta p_E(x') = \frac{p_{E0} \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right)}{2 \sinh \left(\frac{x_E}{L_E} \right)} \left[e^{(x'-x_E)/L_E} + \left(e^{x_E/L_E} + e^{-x_E/L_E} - e^{-x_E/L_E} \right) e^{-x'/L_E} \right]$$

Modo Activo-Directo

Región del Emisor

$$\delta p_E(x') = \frac{p_{E0} \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right)}{2 \operatorname{senh} \left(\frac{x_E}{L_E} \right)} \left[e^{(x_E - x')/L_E} + e^{-(x_E - x')/L_E} \right]$$

$$\delta p_E(x') = p_{E0} \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) \frac{\operatorname{senh} \left(\frac{x_E - x'}{L_E} \right)}{\operatorname{senh} \left(\frac{x_E}{L_E} \right)}$$

La solución aproximada para $x' - x_E < L_E$

$$\operatorname{senh} \left(\frac{x_E - x'}{L_E} \right) \cong \frac{x_E - x'}{L_E}$$

$$\delta p_E(x') \cong p_{E0} \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) \frac{x_E - x'}{L_E}$$

Modo Activo-Directo

Región del Colector

La ecuación ambipolar en ausencia de campo eléctrico y en la situación estacionaria

$$D_C \frac{\partial^2 (\delta p_C(x))}{\partial x^2} - \frac{\delta p_C(x)}{\tau_{C0}} = 0$$

La concentración en exceso

$$\delta p_C(x) = n_C(x) - n_{C0}$$

La solución general

$$\delta p_C(x) = Ce^{x/L_C} + He^{-x/L_C} \quad L_C = \sqrt{D_C \tau_{C0}}$$

Donde L_E es longitud de difusión del portador minoritario en la región del emisor

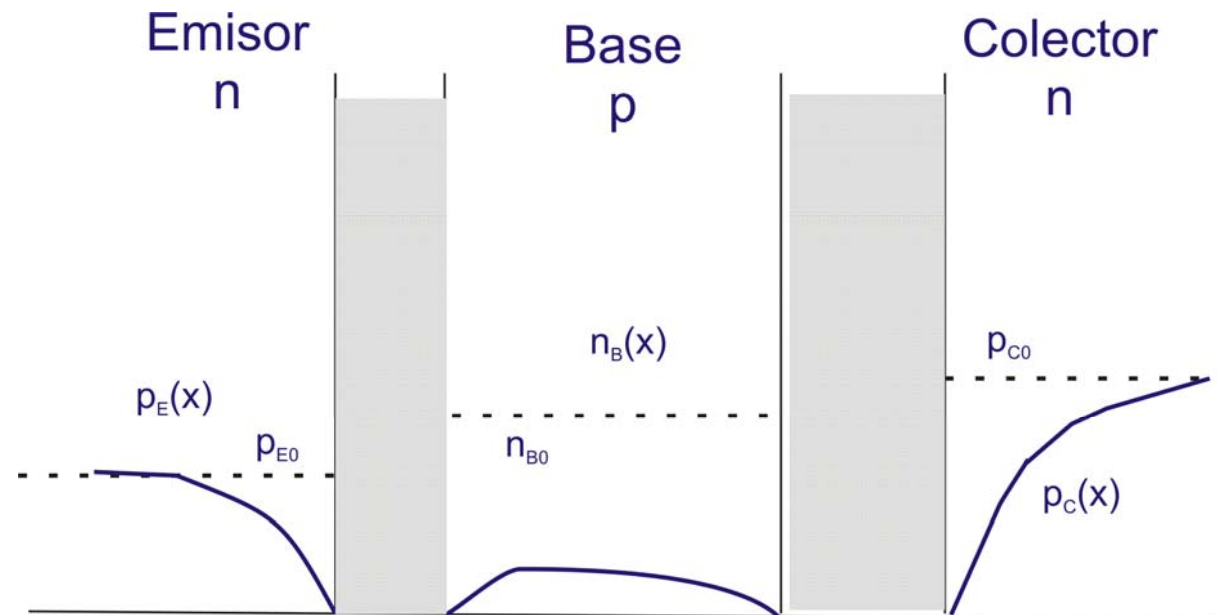
Modo Activo-Directo

Región del Colector

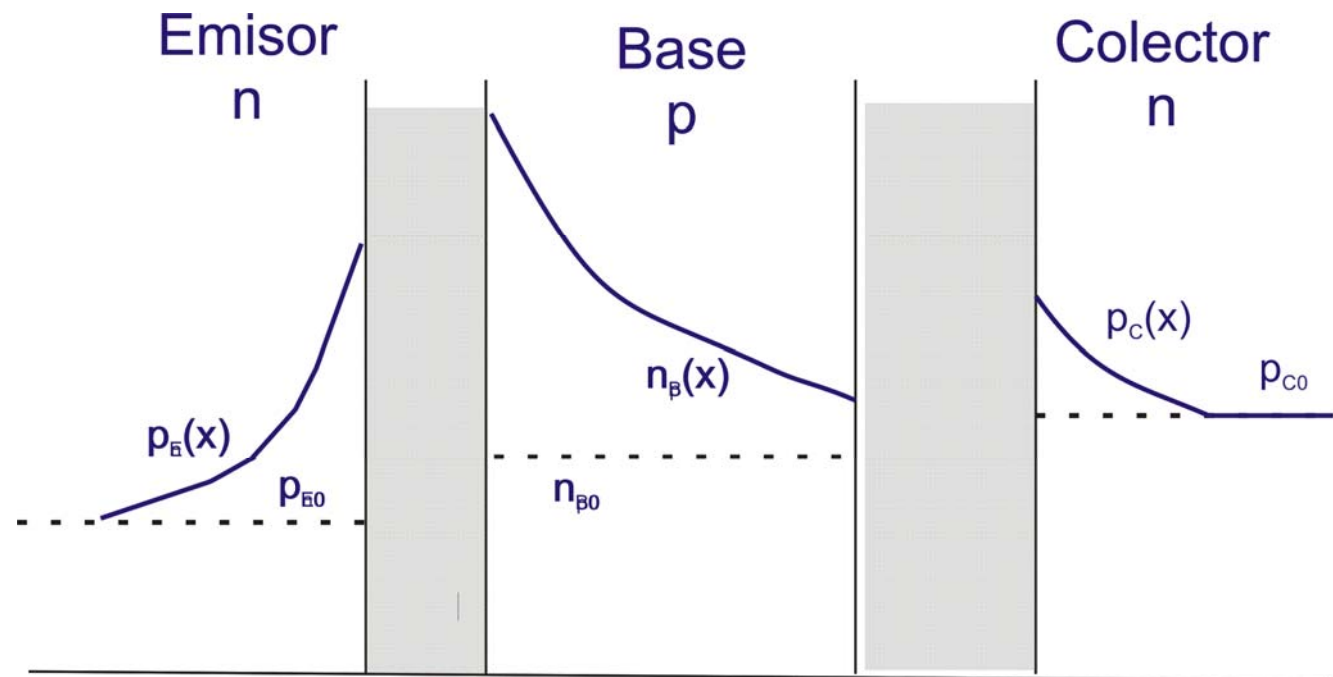
Si la región del colector es larga la condición para mantener **soluciones finitas** $\Rightarrow H = 0$

$$\delta p_C(x'') = -p_{C0} e^{-x''/L_E} \quad \text{Resultado para la polarización en inversa}$$

Modo de corte



Modo de saturación

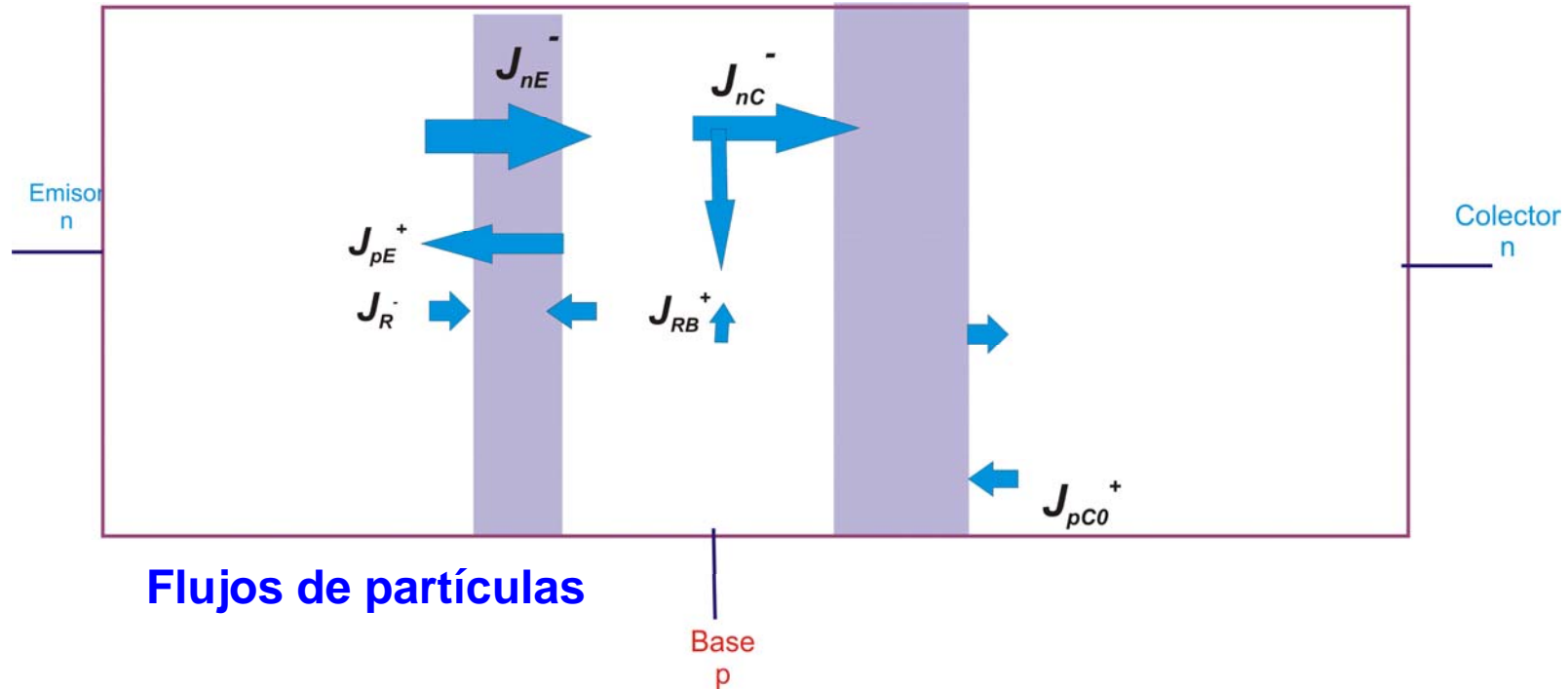


GANANCIA de CORRIENTE de BASE COMÚN a BAJA FRECUENCIA

GANANCIA de CORRIENTE de BASE COMÚN

Cociente de corrientes de colector y emisor

Contribución de Factores



Contribución de Factores

Flujos de partículas

J_{nE} difusión de electrones minoritarios en la base en $x = 0$

J_{nC} difusión de electrones minoritarios en la base en $x = x_E$

J_{RB} diferencia entre J_{nE} y J_{nC} *debido a la recombinación de electrones (portadores minoritarios) con los mayoritarios (huecos) en la base.*

Es el flujo de huecos en la base perdidos por la recombinación

J_{pE} difusión de huecos minoritarios en el emisor en $x' = 0$

J_R *es la recombinación de huecos minoritarios en el colector en $x''=0$*

J_{pC0} difusión de huecos minoritarios en el colector en $x''=0$

J_G *generación de portadores en la juntura B-C polarizada en inversa*

Contribución de Factores

Flujos de partículas

J_{RB} , J_{pE} , J_R son corrientes en la juntura B-E que no contribuyen a la corriente de colector

J_{pC0} , J_G son corrientes de la juntura B-C. No contribuyen a la ganancia de corriente.

La ganancia de corriente a base común

$$\alpha_0 = \frac{I_C}{I_E}$$

$$\alpha_0 = \frac{J_C}{J_E} = \frac{J_{nC} + J_G + J_{pC0}}{J_{nE} + J_R + J_{pE}}$$

Contribución de Factores

La dependencia de la corriente del colector de la de emisor puede explicitarse

$$\alpha = \frac{\partial J_C}{\partial J_E} = \frac{J_{nC}}{J_{nE} + J_R + J_{pE}}$$

Reescribiendo

$$\alpha = \left(\frac{J_{nE}}{J_{nE} + J_{pE}} \right) \left(\frac{J_{nC}}{J_{nE}} \right) \left(\frac{J_{nE} + J_{pE}}{J_{nE} + J_R + J_{pE}} \right)$$

$$\alpha = \gamma \alpha_T \delta$$

$$\gamma = \left(\frac{J_{nE}}{J_{nE} + J_{pE}} \right)$$

$$\alpha_T = \left(\frac{J_{nC}}{J_{nE}} \right)$$

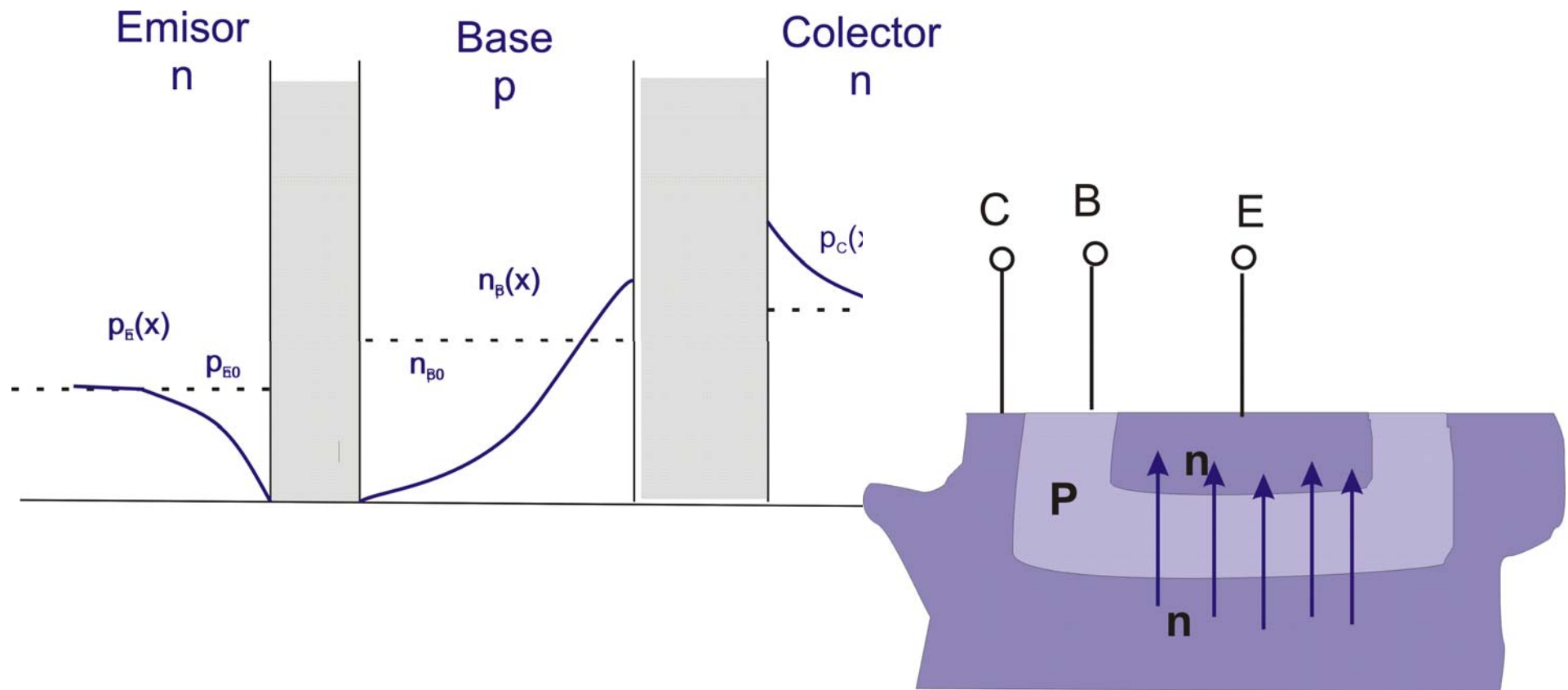
$$\delta = \left(\frac{J_{nE} + J_{pE}}{J_{nE} + J_R + J_{pE}} \right)$$

**Factor de eficiencia de
inyección en emisor**

**Factor de transporte
en base**

**Factor de
recombinación**

Modo activo inverso



Factores de Ganancia de Corriente

Factor de eficiencia de inyección de emisor

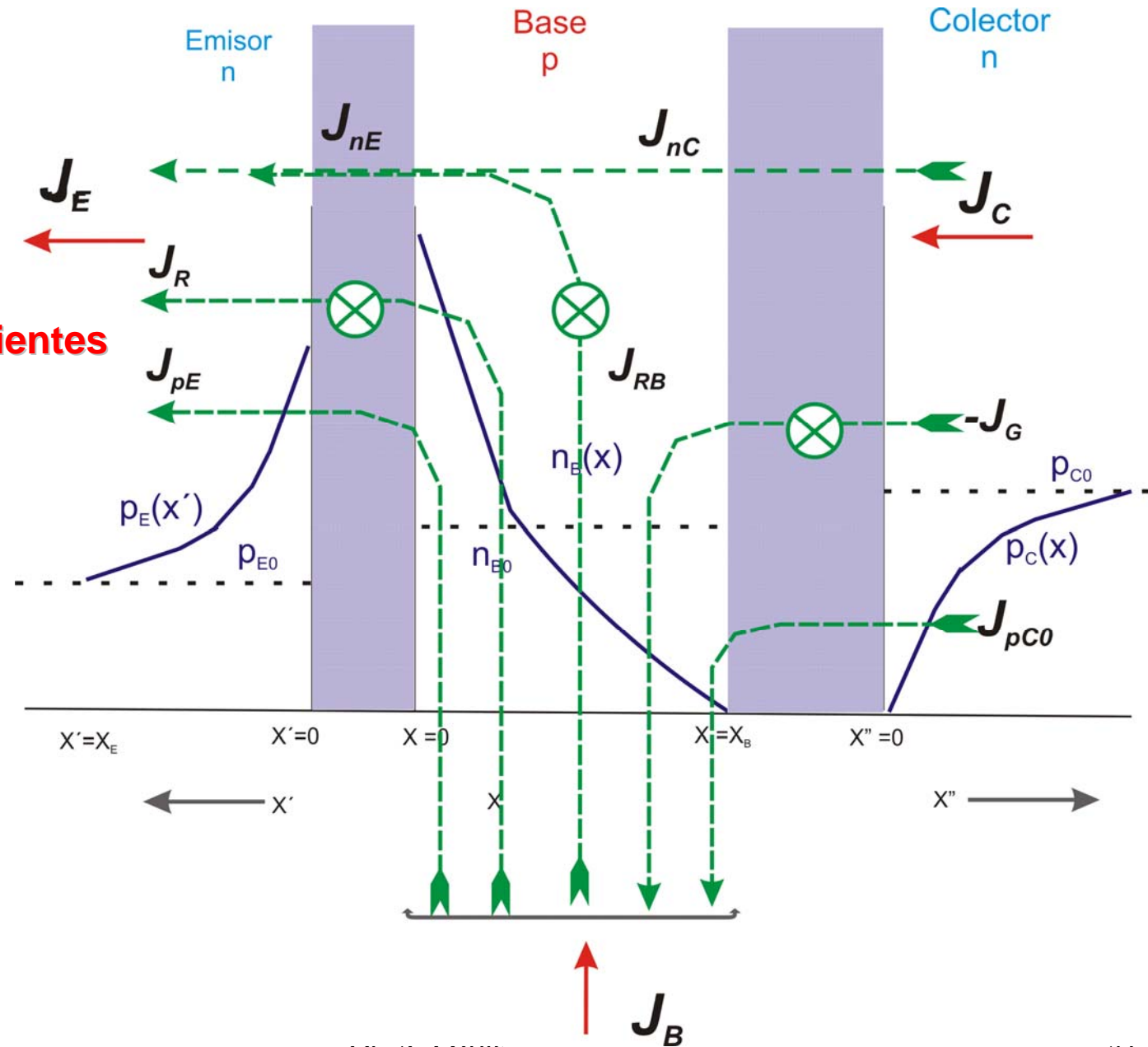
Se define el factor de eficiencia de inyección de emisor

$$\gamma = \frac{J_{nE}}{J_{nE} + J_{pE}}$$

Las corrientes pueden calcularse a partir de las concentraciones de los excesos

$$\left| \begin{array}{l} J_{pE} = -eD_E \frac{d\delta p_E}{dx} \Big|_{x'=0} \\ J_{nE} = -eD_B \frac{d\delta n_B}{dx} \Big|_{x'=0} \end{array} \right.$$

Densidades de Corrientes



Factor de eficiencia de inyección de emisor

$$J_{pE} = -eD_E \frac{d\delta p_E}{dx} \Big|_{x'=0} = -eD_E \frac{p_{E0} \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) d \left[\operatorname{senh} \left(\frac{x_E - x'}{L_E} \right) \right]}{\operatorname{senh} \left(\frac{x_E}{L_E} \right) dx} \Big|_{x'=0}$$

$$J_{pE} = -\frac{eD_E p_{E0} \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right)}{L_E \operatorname{senh} \left(\frac{x_E}{L_E} \right)} (-1) \operatorname{cos} h \left(\frac{x_E}{L_E} \right)$$

$$J_{pE} = \frac{eD_E p_{E0} \left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right)}{L_E \operatorname{tan} h \left(\frac{x_E}{L_E} \right)}$$

Factor de eficiencia de inyección de emisor

$$J_{nE} = -eD_B \left. \frac{d\delta n_B}{dx} \right|_{x=0} = -\frac{eD_B n_{B0}}{\sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} \left. \frac{d \left[\left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) \sinh\left(\frac{x_B - x}{L_B}\right) - \sinh\left(\frac{x}{L_B}\right) \right]}{dx} \right|_{x=0}$$

$$J_{nE} = -\frac{eD_B n_{B0}}{\sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} \frac{\left[-\left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) \cosh\left(\frac{x_B}{L_B}\right) - \cosh(0) \right]}{L_B}$$

$$J_{nE} = \frac{eD_B n_{B0}}{L_B} \frac{\left[\left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) \cosh\left(\frac{x_B}{L_B}\right) + 1 \right]}{\sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)}$$

Factor de eficiencia de inyección de emisor

$$J_{nE} = \frac{eD_B n_{B0}}{L_B} \frac{\left[\left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) \cosh\left(\frac{x_B}{L_B}\right) + 1 \right]}{\sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)}$$

$$J_{nE} = \frac{eD_B n_{B0}}{L_B} \left[\frac{\left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right)}{\tanh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} + \frac{1}{\sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} \right]$$

Factor de eficiencia de inyección de emisor

Si la polarización de la juntura BE es próxima al potencial de juntura

$$\frac{eV_{BE}}{kT} \gg 1 \quad J_{nE} \cong \frac{eD_B n_{B0}}{L_B} \left[\frac{e^{eV_{BE}/kT}}{\tanh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} + \frac{1}{\sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} \right]$$

Además

$$\frac{e^{eV_{BE}/kT}}{\tanh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} \gg \frac{1}{\sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} \quad \Rightarrow \quad J_{nE} \cong \frac{eD_B n_{B0}}{L_B} \frac{e^{eV_{BE}/kT}}{\tanh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)}$$

Factor de eficiencia de inyección de emisor

Si la polarización de la juntura BE es próxima al potencial de juntura

$$\gamma = \frac{J_{nE}}{J_{nE} + J_{pE}} = \frac{1}{1 + \frac{J_{pE}}{J_{nE}}} = \frac{1}{1 + \frac{eD_E p_{E0} (e^{eV_{BE}/kT} - 1)}{L_E \tanh\left(\frac{x_E}{L_E}\right)} \frac{L_B \tanh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)}{eD_B n_{B0} e^{eV_{BE}/kT}}}$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_E L_B p_{E0} \tanh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)}{D_B L_E n_{B0} \tanh\left(\frac{x_E}{L_E}\right)}}$$

Factor de eficiencia de inyección de emisor

Considerando los dopajes de la base y el emisor

$$p_{E0} = \frac{n_i^2}{N_E} \quad n_{B0} = \frac{n_i^2}{N_B}$$

Y las dimensiones de la base y emisor cortas en relación a las longitudes de difusión

$$x_E \ll L_E \quad x_B \ll L_B$$
$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_E L_B}{D_B L_E} \frac{N_B}{N_E} \frac{x_B}{x_E}} \quad \longrightarrow \quad \gamma \cong \frac{1}{1 + \frac{D_E x_B}{D_B x_E} \frac{N_E}{N_B}}$$

Factor de transporte de la base

$$\alpha_T = \frac{J_{nC}}{J_{nE}} \left| \begin{array}{l} J_{nC} = -eD_B \frac{d\delta n_B}{dx} \Big|_{x=x_B} \\ J_{nE} = -eD_B \frac{d\delta n_B}{dx} \Big|_{x=0} \end{array} \right.$$

$$J_{nC} = -eD_B \frac{d\delta n_B}{dx} \Big|_{x=x_B} = -\frac{eD_B n_{B0}}{\sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} \frac{d}{dx} \left[\left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) \sinh\left(\frac{x_B - x}{L_B}\right) - \sinh\left(\frac{x}{L_B}\right) \right] \Big|_{x=x_B}$$

$$J_{nC} = -\frac{eD_B n_{B0}}{\sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} \frac{\left[-\left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) \cosh\left(\frac{x_B - x}{L_B}\right) - \cosh\left(\frac{x}{L_B}\right) \right] \Big|_{x=x_B}}{L_B}$$

Factor de transporte de la base

$$J_{nC} = \frac{eD_B n_{B0}}{L_B \sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} \left[\left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) + \cosh\left(\frac{x_B}{L_B}\right) \right]$$

Además

$$J_{nE} = \frac{eD_B n_{B0}}{\sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} \frac{\left[\left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) \cosh\left(\frac{x_B - x}{L_B}\right) + \cosh\left(\frac{x}{L_B}\right) \right] \Big|_{x=0}}{L_B}$$

$$J_{nE} = \frac{eD_B n_{B0}}{L_B \sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} \left[\left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) \cosh\left(\frac{x_B}{L_B}\right) + 1 \right]$$

Factor de transporte de la base

$$\alpha_T = \frac{J_{nC}}{J_{nE}} = \frac{\frac{eD_B n_{B0}}{L_B \sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} \left[\left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) + \cosh\left(\frac{x_B}{L_B}\right) \right]}{\frac{eD_B n_{B0}}{L_B \sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} \left[\left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) \cosh\left(\frac{x_B}{L_B}\right) + 1 \right]}$$

$$\alpha_T = \frac{\left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) + \cosh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)}{\left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) \cosh\left(\frac{x_B}{L_B}\right) + 1}$$

Factor de transporte de la base

Para tensiones de polarización altas

$$\frac{eV_{BE}}{kT} \gg 1 \quad \rightarrow \quad e^{\frac{eV_{BE}}{kT}} \gg 1$$

$$\alpha_T \cong \frac{e^{eV_{BE}/kT}}{e^{eV_{BE}/kT} \cosh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} = \frac{1}{\cosh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)}$$

Además

$$x_B \ll L_B$$

$$\alpha_T \cong \frac{1}{1 + \frac{1}{2}\left(\frac{x_B}{L_B}\right)^2} = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{x_B}{L_B}\right)^2$$

Factor de recombinación

$$\delta = \frac{J_{nE} + J_{pE}}{J_{nE} + J_R + J_{pE}} \approx \frac{J_{nE}}{J_{nE} + J_R} = \frac{1}{1 + \frac{J_R}{J_{nE}}}$$

Donde se supuso $J_{pE} \ll J_{nE}$

La corriente de recombinación en polarización directa en la juntura pn

$$J_R = \frac{ex_{BE}n_i}{2\tau_0} e^{\frac{eV_{BE}}{2KT}} = J_{r0} e^{\frac{eV_{BE}}{2KT}}$$

x_{BE} El ancho de la zona de vaciamiento

Factor de recombinación

$$J_{nE} = \frac{eD_B n_{B0}}{L_B \sinh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)} \left[\left(e^{eV_{BE}/kT} - 1 \right) \cosh\left(\frac{x_B}{L_B}\right) + 1 \right] \cong \frac{eD_B n_{B0} e^{eV_{BE}/kT}}{L_B \tanh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)}$$

$$J_{nE} = J_{s0} e^{\frac{eV_{BE}}{KT}}$$

donde

$$J_{s0} = \frac{eD_B n_{B0}}{L_B \tanh\left(\frac{x_B}{L_B}\right)}$$

$$\delta \cong \frac{1}{1 + \frac{J_R}{J_{nE}}} \cong \frac{1}{1 + \frac{J_{r0} e^{\frac{eV_{BE}}{2KT}}}{J_{s0} e^{\frac{eV_{BE}}{KT}}}} \quad \rightarrow \quad \delta \cong \frac{1}{1 + \frac{J_{r0}}{J_{s0}} e^{-\frac{eV_{BE}}{2KT}}}$$