

EL3004-Circuitos Electrónicos Analógicos

Clase No. 5: Transistores BJT

Marcos Diaz

Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE)
Universidad de Chile

Septiembre, 2011

1 Repaso Clase #4

2 BJT: Estructura y operación básica

- Características de colector del BJT NPN
- Región activa y Base común
- Flujos de Huecos y Electrones en la región activa
- Características $I - V$ en la región activa
 - Corriente de colector
 - Corriente de base
 - Corriente de emisor
- Ganancia de Corriente en la región activa

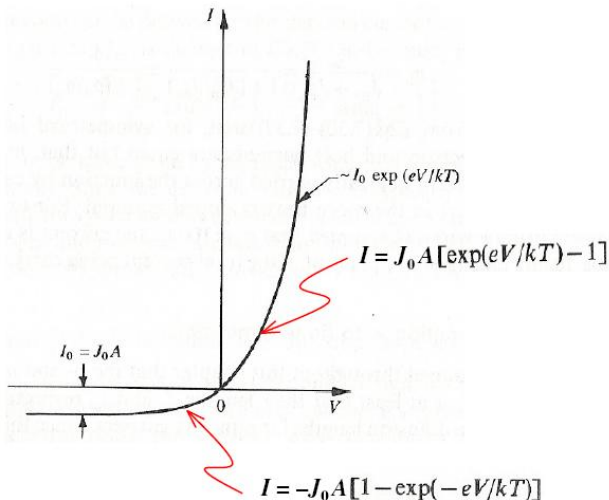
3 Resumen Clase #5

Repaso Clase #4

- Junturas np sin polarización
- Junturas np con polarización en directa
- Junturas np con polarización en reversa

Junturas pn

Corriente por la juntura



A cross-sectional diagram of a pnp transistor. The structure consists of a p-type substrate at the bottom, which contains an n⁺ buried layer. Above the substrate is an n⁺ emitter region, followed by a p-type base, and then an n⁺ collector region. This forms an n⁺-p-n sandwich, also referred to as an intrinsic npn transistor. The entire device is covered by a field oxide layer. Three metal contacts are shown: a metal contact to the base, an n⁺ polysilicon contact to the n⁺ emitter region, and a metal contact to the collector. The diagram is labeled with 'A' and 'A'' at the ends, indicating a cross-section. The label '(a)' is at the bottom center.

A set of small navigation icons typically found in Beamer presentations, including symbols for back, forward, search, and other slide controls.

Estructura BJTs

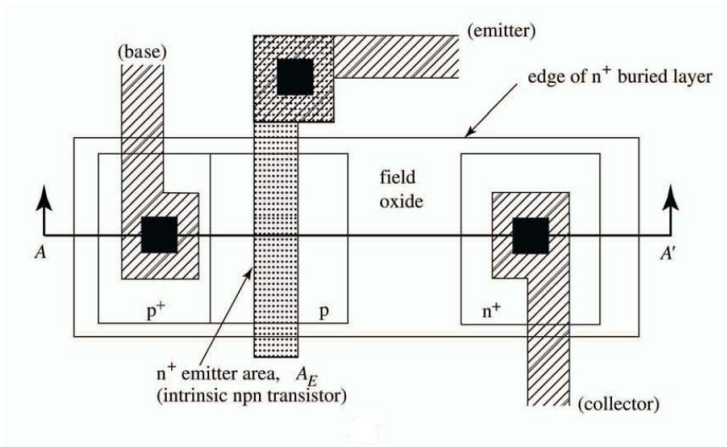


Figura: Vista superior del Layout de un BJT

Características de colector del BJT

Para obtener las curvas características del colector se utiliza un circuito donde I_B es una variable controlada, la cual esta relacionada con el voltaje V_{BE} . En la figura 4 se muestra el circuito de prueba y en la figura 5 las curvas características $I_C - V_{CE}$.

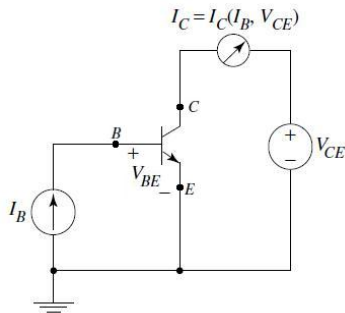


Figura: Circuito de prueba para obtener características del colector.

Características de colector del BJT

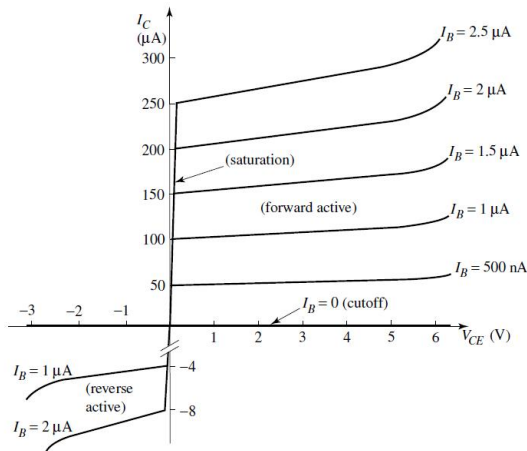


Figura: Curvas características $I_C - V_{CE}$.

Región activa y Base común

La figura 6 muestra un modelo simplificado de una dimensión del dispositivo intrínsecamente. En donde se puede ver que el BJT tiene dos junturas pn siendo la base común y la que está relacionada con los portadores tipo p. En la figura 7 se muestran las regiones de operación para un BJT de base común.

- Suficientemente cercanas las junturas para la interacción de los portadores minoritarios tipo p $\Rightarrow$ se difunden rápidamente a través de la base.
- Suficientemente apartada para no interactuar con las zonas de depleción $\Rightarrow$ previene el traslape.

Simplified one-dimensional model of intrinsic device:

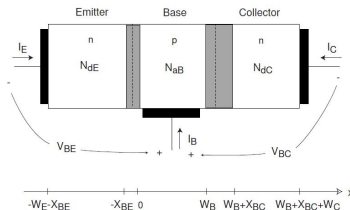


Figura: Interacción de los portadores minoritarios y mayoritarios.

Región activa y Base común

Regions of operation:

$$V_{CE} = V_{BE} - V_{BC}$$

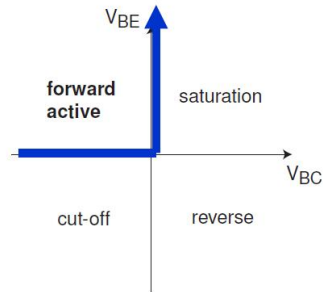
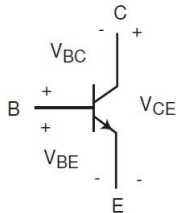


Figura: Regiones de operación para un BJT de base común.

Región activa y Base común

En la figura 8 se muestra el modo de operar del BJT ante la acción de polarización de sus terminales, en donde se aprecia que:

- $V_{BE} > 0 \Rightarrow$ inyección de electrones desde el **Emisor** a la **Base**. Inyección de huecos desde la **Base** al **Emisor**.
- $V_{BC} < 0 \Rightarrow$ extracción de electrones desde la **Base** al **Colector**. Extracción de huecos desde el **Colector** a la **Base**.

Basic Operation: forward-active regime

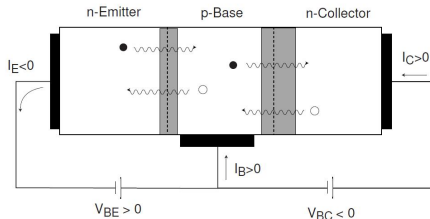


Figura: Operación del BJT ante polarización de sus terminales.

Región activa y Base común

En la figura 9 se muestra el comportamiento de los portadores en equilibrio termal.

Basic Operation: forward-active regime

• Carrier profiles in thermal equilibrium:

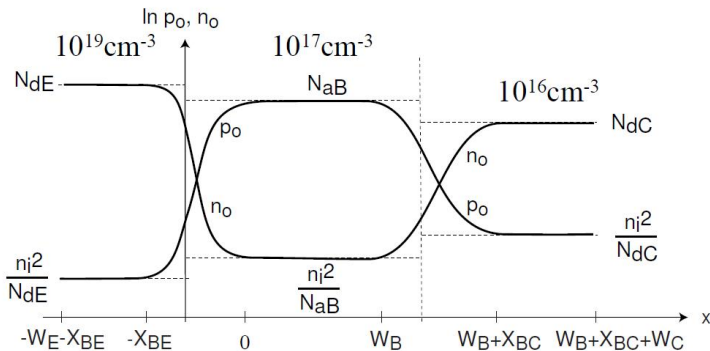


Figura: Comportamiento de los portadores en equilibrio termal.

Región activa y Base común

En la figura 10 se muestra el comportamiento de los portadores en la región activa.

- **Carrier profiles in forward-active regime:**

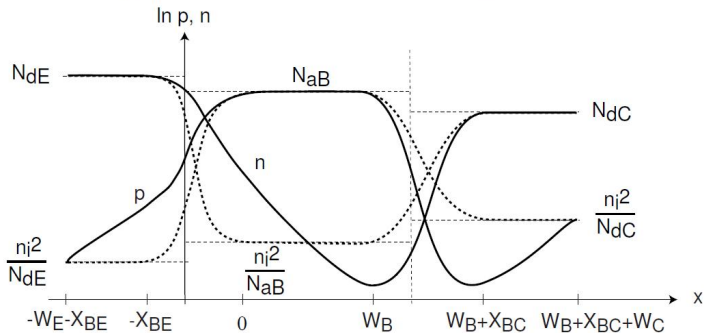


Figura: Comportamiento de los portadores en la región activa.

Región activa y Base común

En la figura 11 se muestran las corrientes dominantes que se producen en el BJT ante la acción de la polarización y posterior movimiento de los portadores. Las corrientes se producen de las siguientes maneras:

- I_C : inyección de electrones desde el **Emisor** a la **Base** y acumulación por el **Colector**.
- I_B : inyección de huecos desde la **Base** al **Emisor**.
- I_E : $I_E = -(I_C + I_B)$.

Dominant current paths in forward active regime:

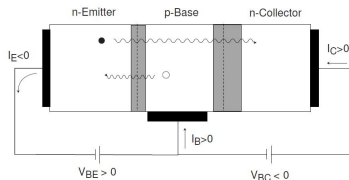


Figura: Producción de las corrientes dominantes en el BJT.

Flujos de Huecos y Electrones en la región activa

A continuación se da una lista de los fenómenos que ocurren en el proceso de difusión al interior de un BJT:

- El tamaño del torrente de flujo de electrones es mayor que el flujo de los huecos.
- Los electrones son suministrados por el contacto del emisor, inyectando a través de la juntura base-emisor y difundiendo por la base.
- Campo Eléctrico en la juntura base-colector extrae electrones hacia el interior del colector.
- Huecos son suministrados por el contacto de la base y difundidos a través del emisor.
- Los huecos se recombinan en el contacto óhmico del emisor.

Características $I - V$ en la región activa

Corriente de colector

Enfoque en la corriente de colector (figura 12).

Collector current: focus on electron diffusion in base

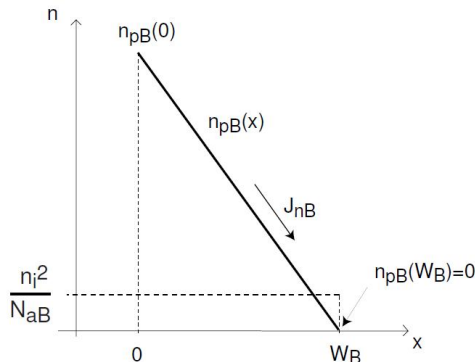


Figura: Corriente de colector, enfocado a la difusión de electrones en la base.

Características $I - V$ en la región activa

Corriente de colector

Condiciones de borde, ecuación 107:

$$n_{pB}(0) = n_{pB0} e^{\frac{V_{BE}}{V_{th}}}, \quad n_{pB}(W_B) = 0 \quad (107)$$

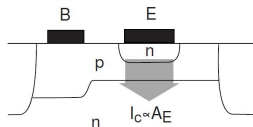
Comportamiento Electrón, ecuación 108:

$$n_{pB}(x) = n_{pB}(0) \left| 1 - \frac{x}{W_B} \right| \quad (108)$$

Densidad de corriente de electrones, ecuación 109:

$$J_{nB} = qD_n \frac{dn_{pB}}{dx} = -qD_n \frac{n_{pB}(0)}{W_B} \quad (109)$$

La corriente de colector es proporcional al área de la juntura base-emisor A_E , como lo muestra la figura 13:



Características $I - V$ en la región activa

Corriente de colector

Finalmente la corriente por el colector queda como la ecuación 110 o simplificada como la ecuación 111.

$$I_C = -J_{nB}A_E = qA_E \frac{D_n}{W_B} n_{pB_0} e^{\left[\frac{V_{BE}}{V_{th}} \right]} \quad (110)$$

$$I_C = I_S e^{\left[\frac{V_{BE}}{V_{th}} \right]} \quad \text{Donde } I_S = \text{corriente de saturación del transistor} \quad (111)$$

Características $I - V$ en la región activa

Corriente de base

Enfoque en la inyección de huecos y recombinación en el contacto del emisor (figura 14).

Base current: focus on hole injection and recombination at emitter contact.

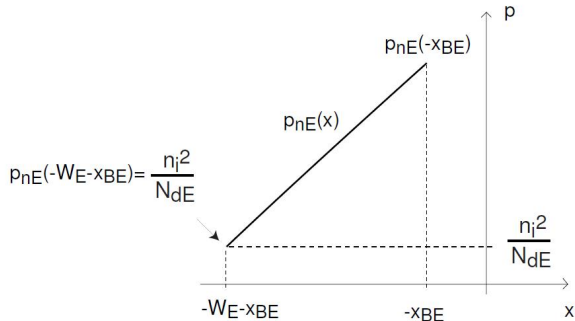


Figura: Corriente de base, enfocada en la inyección de huecos.

Características $I - V$ en la región activa

Corriente de base

Condiciones de borde, ecuación 112.

$$p_{nE}(-x_{BE}) = p_{nE_0} e^{\left[\frac{V_{BE}}{V_{th}} \right]}, \quad p_{nE}(-W_E - x_{BE}) = p_{nE_0} \quad (112)$$

Comportamiento huecos, ecuación 113.

$$p_{nE}(x) = [p_{nE}(-x_{BE}) - p_{nE_0}] \left(1 + \frac{x + x_{BE}}{W_E} \right) + p_{nE_0} \quad (113)$$

Densidad de corriente de huecos, ecuación 114:

$$J_{pE} = -qD_p \frac{dp_{nE}}{dx} = -qD_p \frac{p_{nE}(-x_{BE}) - p_{nE_0}}{W_E} \quad (114)$$

Características $I - V$ en la región activa

Corriente de base

La corriente de base es proporcional al área de la juntura base-emisor A_E , como lo muestra la figura 15:

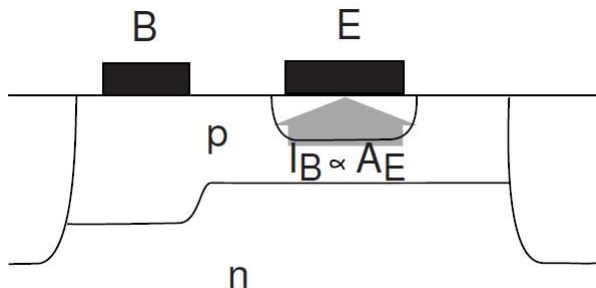


Figura: Corriente de base es proporcional al área de la juntura base-emisor.

Características $I - V$ en la región activa

Corriente de base

Así la corriente total de base se muestra en la ecuación 115 y una aproximación se puede ver en la ecuación 116.

$$I_B = -J_{pE}A_E = qA_E \frac{D_p}{W_E} p_{nE_0} \left(e^{\left[\frac{V_{BE}}{V_{th}} \right]} - 1 \right) \quad (115)$$

$$I_B \approx qA_E \frac{D_p}{W_E} p_{nE_0} e^{\left[\frac{V_{BE}}{V_{th}} \right]} \quad (116)$$

Características $I - V$ en la región activa

Corriente de emisor

La corriente de emisor se obtiene de la relación $-(I_B + I_C)$ y se puede ver el resultado en la ecuación 117:

$$I_E = - \left[\left(q A_E \frac{D_p}{W_E} p_{nE_0} \right) + \left(q A_E \frac{D_n}{W_B} n_{pB_0} \right) \right] e^{\left[\frac{V_{BE}}{V_{th}} \right]} \quad (117)$$

Ganancia de Corriente en la región activa

$$\alpha_F = \frac{I_C}{|I_E|} = \frac{1}{1 + \frac{N_{aB} D_p W_B}{N_{dE} D_n W_E}} \quad (118)$$

Queremos que α_F sea cercano a la unidad $\rightarrow$ típicamente $\alpha_F = 0,99$

$$I_B = -I_E - I_C = \frac{I_C}{\alpha_F} - I_C = I_C \left(\frac{1 - \alpha_F}{\alpha_F} \right) \quad (119)$$

$$\beta_F = \frac{I_C}{I_B} = \left(\frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} \right) \quad (120)$$

$$\beta_F = \frac{I_C}{I_B} = \frac{n_{pB_0} \frac{D_n}{W_B}}{p_{nE_0} \frac{D_p}{W_E}} = \frac{N_{dE} D_n W_E}{N_{aB} D_p W_B} \quad (121)$$

Para maximizar β_F :

- $N_{dE} \gg N_{aB}$
- $W_E \gg W_B$
- queremos npn, por sobre pnp porque $D_n \gg D_p$

Resumen Clase #5

- Estructura y operación del transistor BJT
 - Características Físicas
 - Región activa
 - Flujos de huecos y electrones
 - Características I-V
 - Ganancia de corriente