

Clase 14¹ - El Transistor Bipolar de Juntura (I)

RÉGIMEN ACTIVO DIRECTO

Contenido:

1. TBJ: Estructura y operación básica
2. Características I-V en régimen activo directo

Lecturas recomendadas:

- Müller, Kamins, “Device Electronics for Integrated Circuits”, Ch. 6, §§6.1–6.2.
- Pedro Julian, “Introducción a la Microelectronica”, Ch. 6, §§6.1–6.3 .
- Howe, Sodini, “Microelectronics: An Integrated Approach”, Ch. 7, §§7.3–7.4.
- Gray, Hurst, Lewis, Meyer, “Analysis and Design of Analog Integrated Circuits”, Ch. 1, §§1.3.

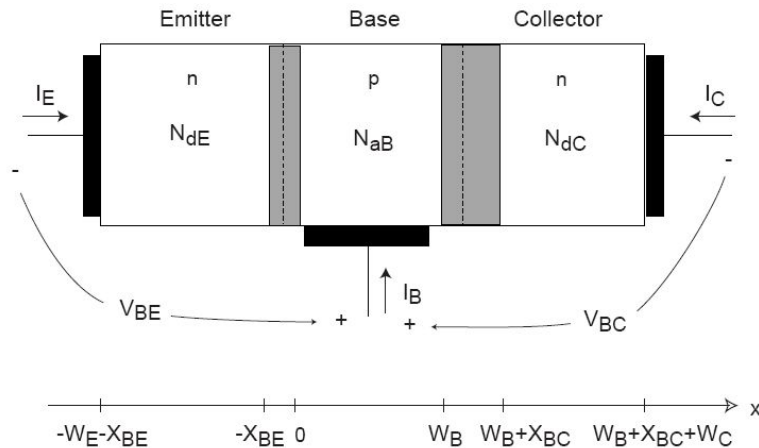
¹Esta clase es una traducción, realizada por los docentes del curso “Dispositivos Semiconductores” de la FIUBA, de la correspondiente hecha por el prof. Jesús A. de Alamo para el curso “6.012 - Microelectronic Devices and Circuits” del MIT. Cualquier error debe adjudicarse a la traducción.

Preguntas disparadoras:

- ¿Cómo es un transistor bipolar de juntura?
- ¿Cómo funciona un transistor bipolar de juntura?
- ¿Cuales son las principales dependencias de las corrientes del TBJ en régimen activo directo?

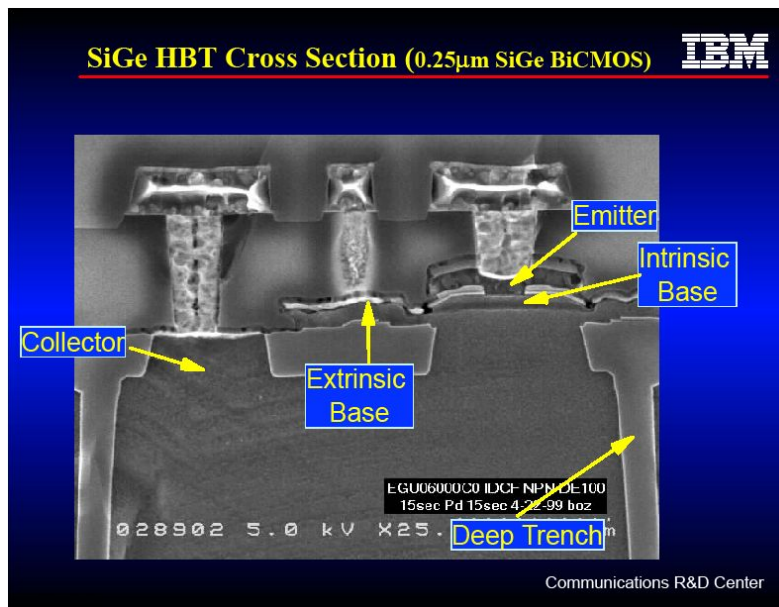
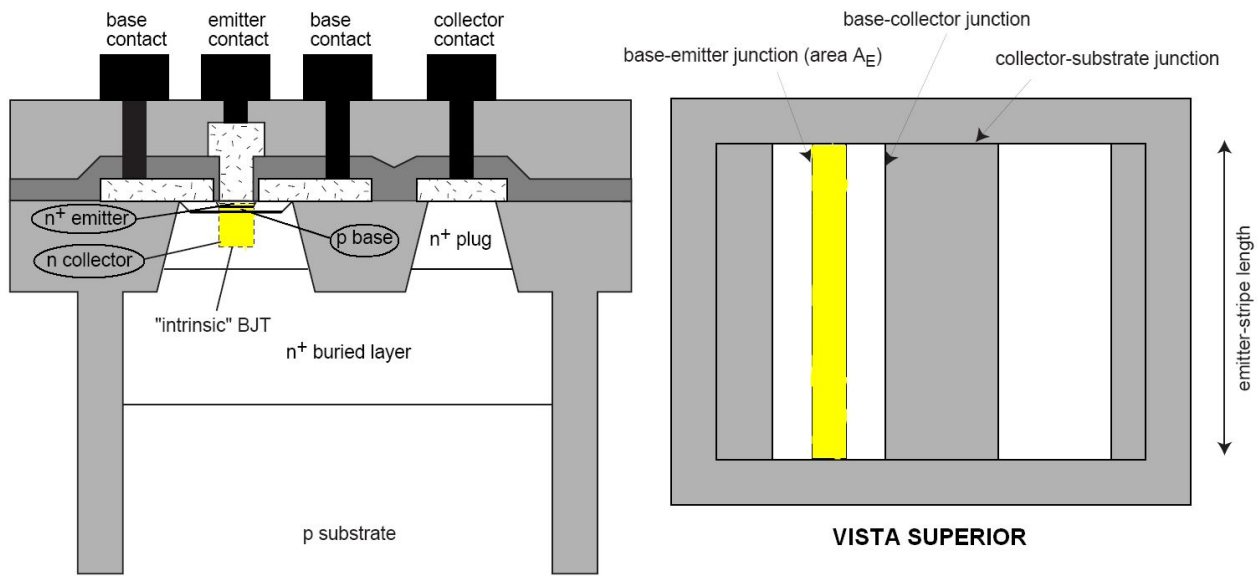
1. TBJ: estructura y operación básica

□ ESQUEMA SIMPLIFICADO

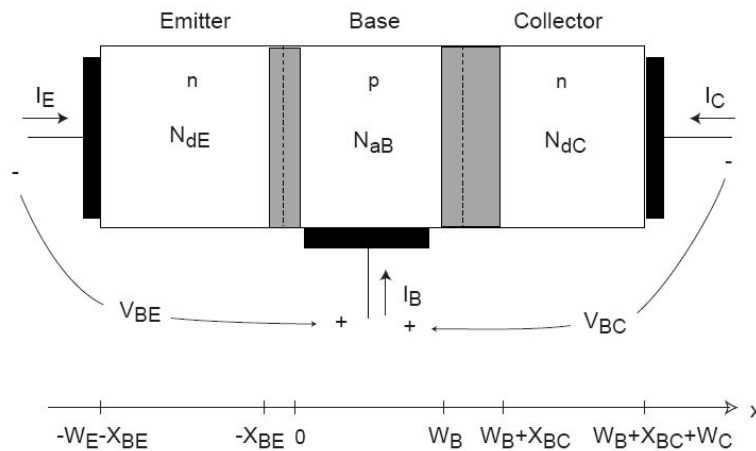


El TBJ permite manejar corrientes elevadas a altas velocidades \Rightarrow es excelente para aplicaciones analógicas y para interfaces de entrada en sistemas de comunicaciones (RF). Su desventaja es el consumo de potencia.

Fabricación en tecnología planar:

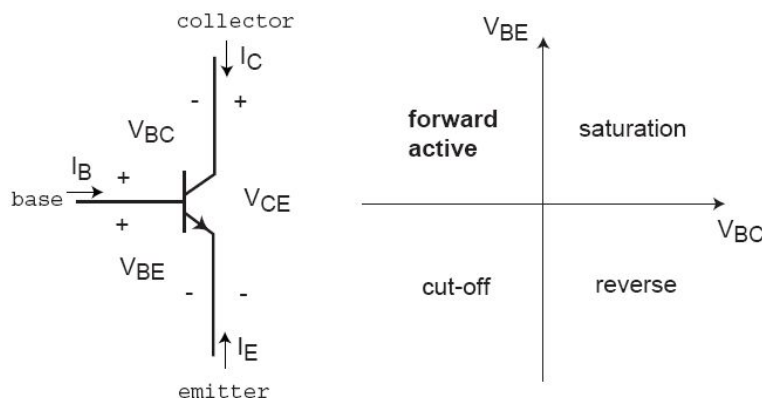


□ MODELO SIMPLIFICADO UNIDIMENSIONAL DEL TBJ INTRÍNSECO

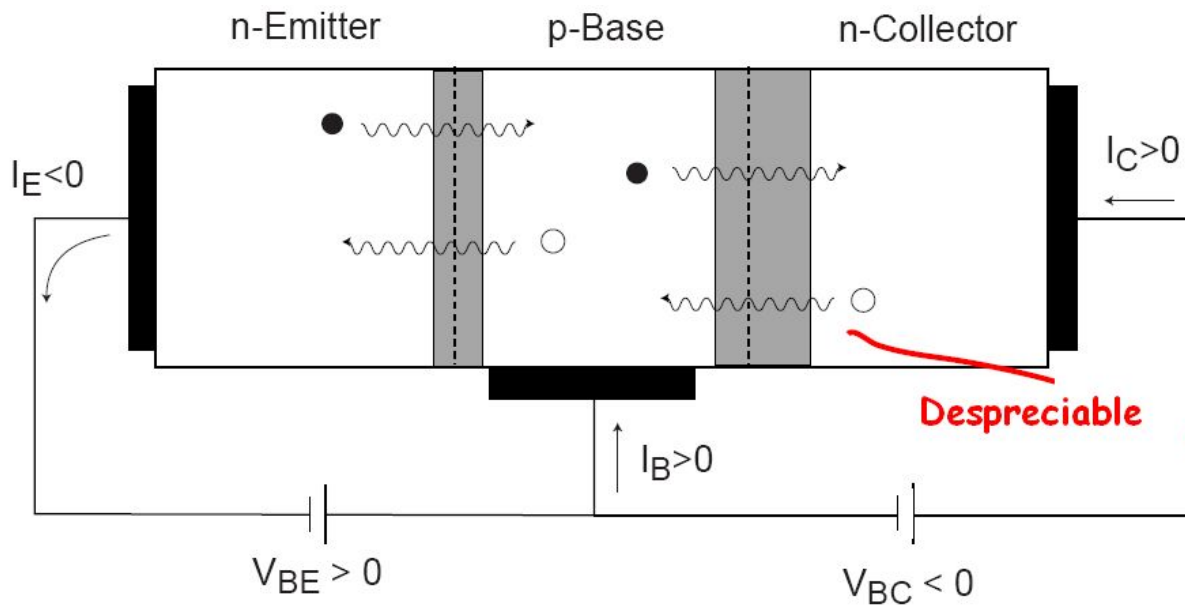


TBJ = dos junturas PN adyacentes:

- suficientemente juntas como para que los portadores minoritarios interactúen (pueden difundirse suficientemente rápido sin recombinarse en la base).
- suficientemente separadas como para que las regiones de deserción no se solapen (*punchthrough*).
- Símbolo TBJ NPN y regímenes de operación



□ OPERACIÓN BÁSICA EN RÉGIMEN ACTIVO DIRECTO



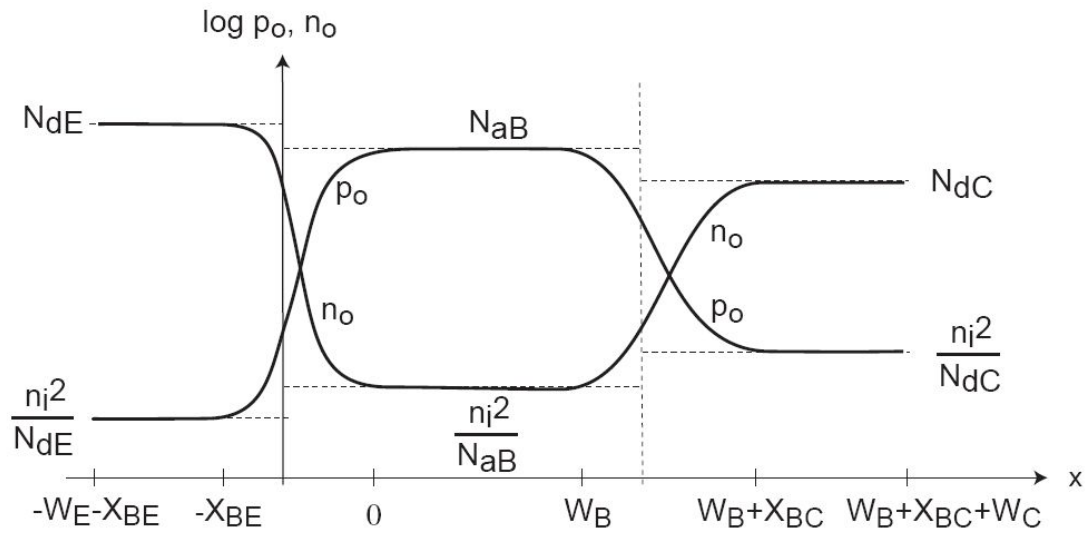
$V_{BE} > 0 \Rightarrow$ juntura en directa
 inyección de electrones de E a B
 inyección de huecos de B a E

$V_{BC} < 0 \Rightarrow$ juntura en inversa
 extracción de electrones de B a C
 extracción de huecos de C a B

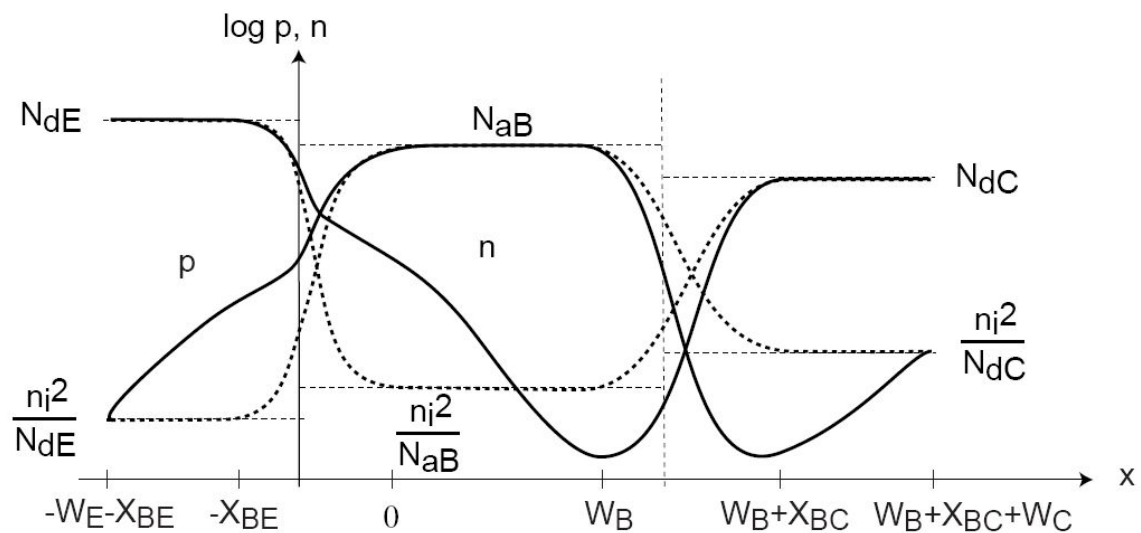
Efecto Transistor:

¡Los electrones inyectados de E a B, salen por el C!

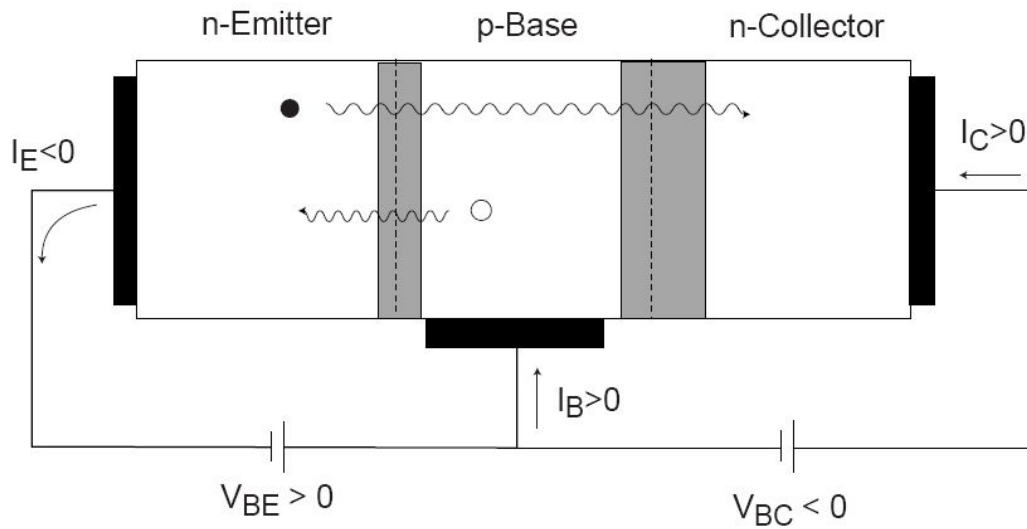
- Concentración de portadores en equilibrio térmico:



- Concentración de portadores en régimen activo directo:



- Corrientes dominantes en régimen activo directo:



I_C : Inyección de electrones de E a B, difusión en B y extracción de B a C.

I_B : Inyección de huecos de B a E.

Extracción de huecos de B a C (despreciable).

Recombinación de electrones provenientes de E con huecos de B (despreciable).

$$I_E = -I_C - I_B$$

En régimen o modo activo directo:

- V_{BE} (o I_B) controla I_C (“efecto transistor”)
- I_C independiente de V_{BC} (“aislación”)
- el precio a pagar por el control: $I_B \Rightarrow$ Hay consumo de potencia en la base.

Comparación con el MOSFET:

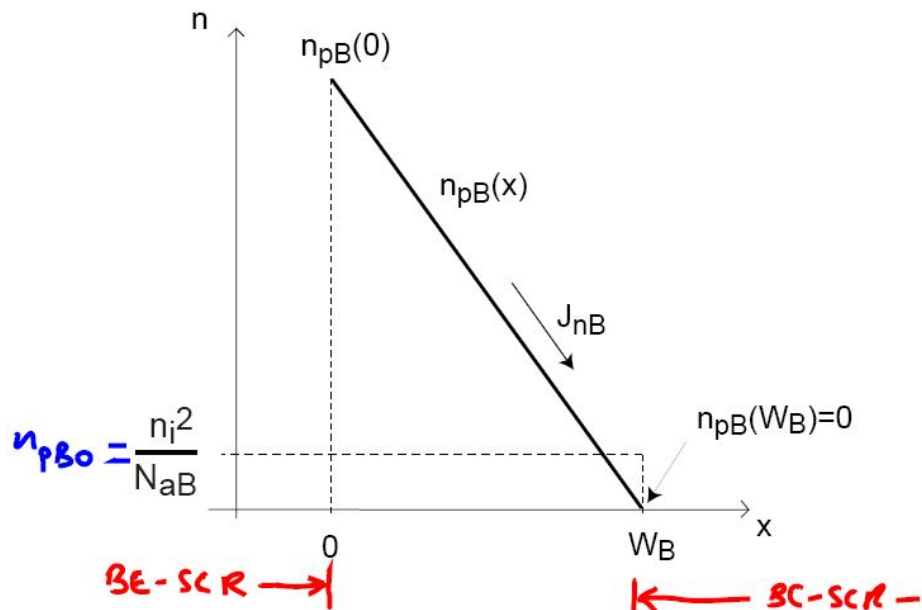
Característica	MOSFET ideal Saturación	TBJ ideal MAD
Terminal de control	gate	base
Dependencia de la corriente con la tensión	cuadratica	exponencial
Corriente de entrada en continua al terminal de control	0	exponencial

Se define la figura de mérito β_F o HFE como el cociente entre la corriente de colector y de base:

$$\beta_F = \frac{I_C}{I_B} \quad (\text{se desea que sea grande, } \simeq 100)$$

2. Características I-V en régimen activo directo

□ *Corriente de Colector*: nos concentramos en la difusión de electrones en la base.



Observación: En las QNR de emisor y base, los e^- son mayoritarios y se transportan por arrastre.

Condiciones de borde:

$$n_{pB}(0) = n_{pB0} \exp \frac{q V_{BE}}{kT}, \quad n_{pB}(W_B) = 0$$

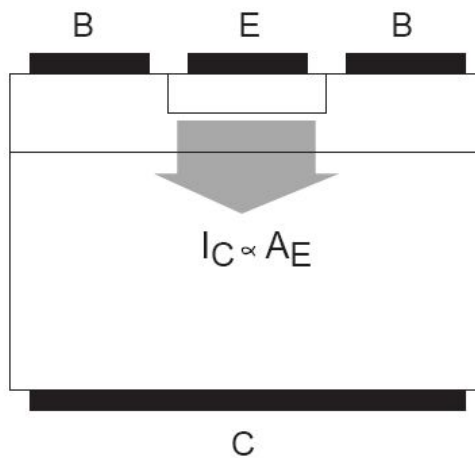
Perfil de electrones:

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

Densidad de corriente de electrones:

$$J_{nB} = q D_n \frac{\partial n_{pB}(x)}{\partial x} = -q D_n \frac{n_{pB}(0)}{W_B}$$

La corriente de electrones es proporcional al area de la juntura base-emisor A_E :



Corriente de colector:

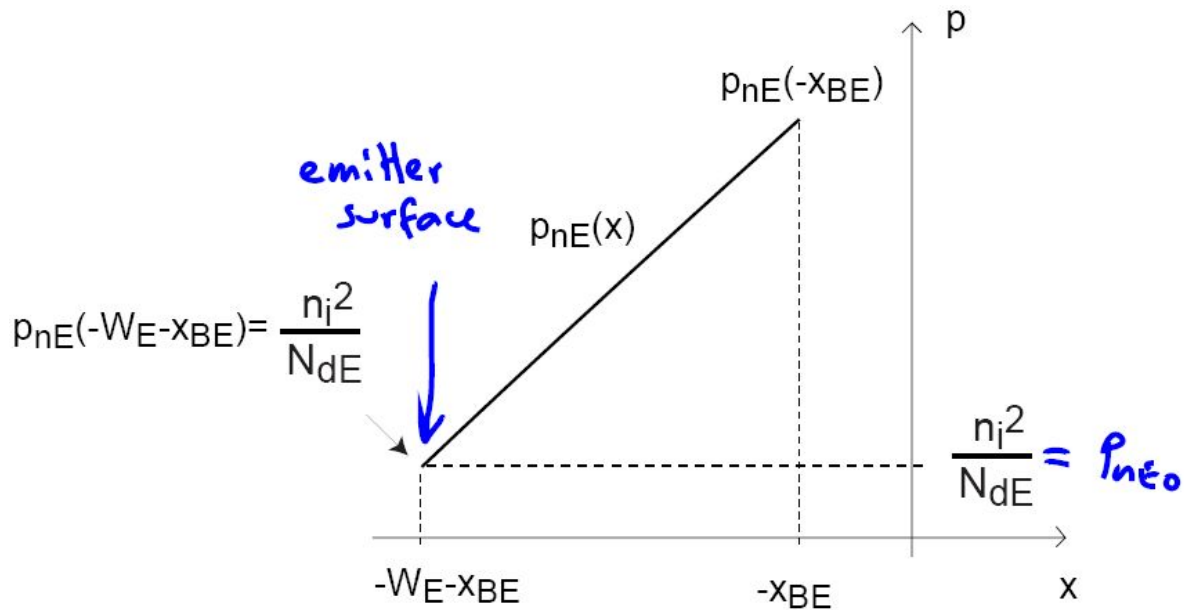
$$I_C = -J_{nB} A_E = q A_E \frac{D_n}{W_B} n_{pB0} \exp \frac{q V_{BE}}{kT}$$

o

$$I_C = I_S \exp \frac{q V_{BE}}{kT}$$

$I_S \equiv$ corriente de saturación del colector [A]

□ *Corriente de base*: nos focalizamos en la inyección de huecos y su recombinación en el emisor.



Condiciones de borde:

$$p_{nE}(-x_{BE}) = p_{nE0} \exp\left(\frac{q V_{BE}}{kT}\right), \quad p_{nE}(-W_E - x_{BE}) = p_{nE0}$$

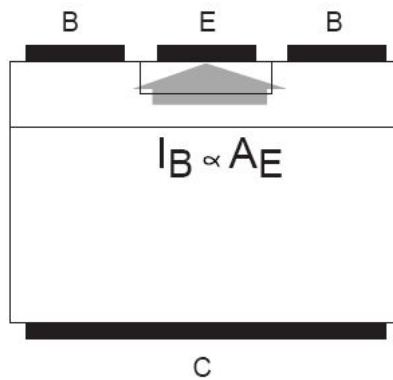
Perfil de huecos:

$$p_{nE}(x) = [p_{nE}(-x_{BE}) - p_{nE0}] \left(1 + \frac{x + x_{BE}}{W_E}\right) + p_{nE0}$$

Densidad de corriente de huecos:

$$J_{pE} = -q D_p \frac{\partial p_{nE}(x)}{\partial x} = -q D_p \frac{p_{nE}(-x_{BE}) - p_{nE0}}{W_E}$$

La corriente de base es proporcional al área de la juntura base-emisor A_E :



Corriente de base:

$$I_B = -J_{pE} A_E = q A_E \frac{D_p}{W_E} p_{nE0} \left(\exp \frac{q V_{BE}}{kT} - 1 \right)$$

Luego:

$$I_B = \frac{I_S}{\beta_F} \left(\exp \frac{q V_{BE}}{kT} - 1 \right)$$

Para $V_{BE} \gg \frac{kT}{q}$:

$$I_B \simeq \frac{I_C}{\beta_F}$$

□ *Ganancia de corriente:*

$$\beta_F = \frac{I_C}{I_B} = \frac{n_{pB0} \frac{D_n}{W_B}}{p_{nE0} \frac{D_p}{W_E}} = \frac{N_{dE} D_n W_E}{N_{aB} D_p W_B}$$

Para maximizar β_F :

- $N_{dE} \gg N_{aB}$
- $W_E \gg W_B$
- mejor *nnp* que *pnnp* (debido a que $D_n > D_p$)

Estado actual del arte en TBJs circuitos integrados para aplicaciones analógicas de instrumentación o comunicaciones:

$$I_C \sim 0.1 - 1 \text{ mA}, \quad \beta_F \sim 50 - 300$$

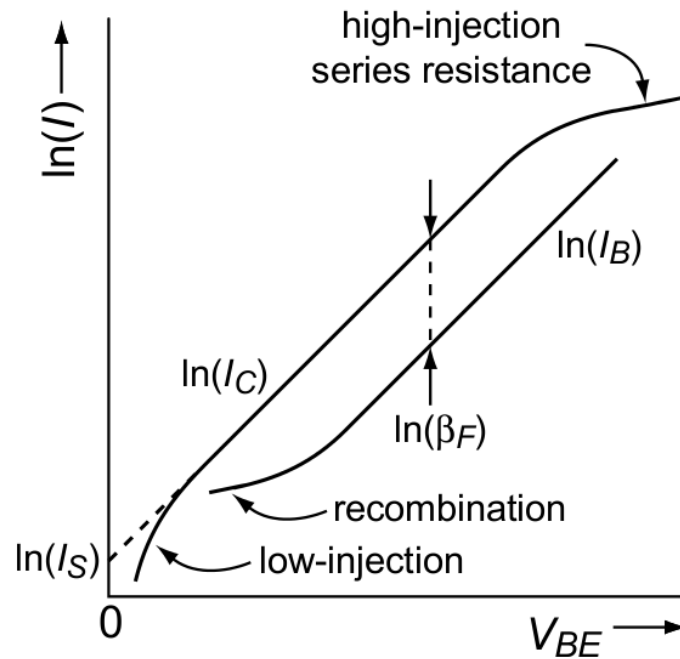
β_F es difícil de controlar en el proceso de fabricación

⇒ Necesitamos circuitos insensibles a variaciones en β_F

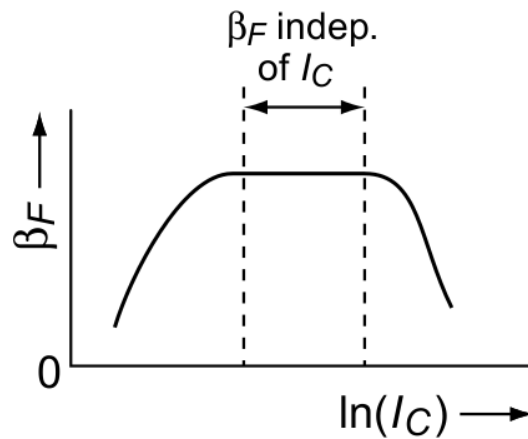
⇒ se utilizan circuitos realimentados.

Análogo a dificultad para controlar V_T y k en MOSFETs

□ GRÁFICO DE GUMMEL: semilogarítmico de I_C e I_B vs. V_{BE} :



En consecuencia, dependencia de β_F con I_C :



Dispersión de los parámetros de los dispositivos debido a variaciones en el proceso de fabricación:

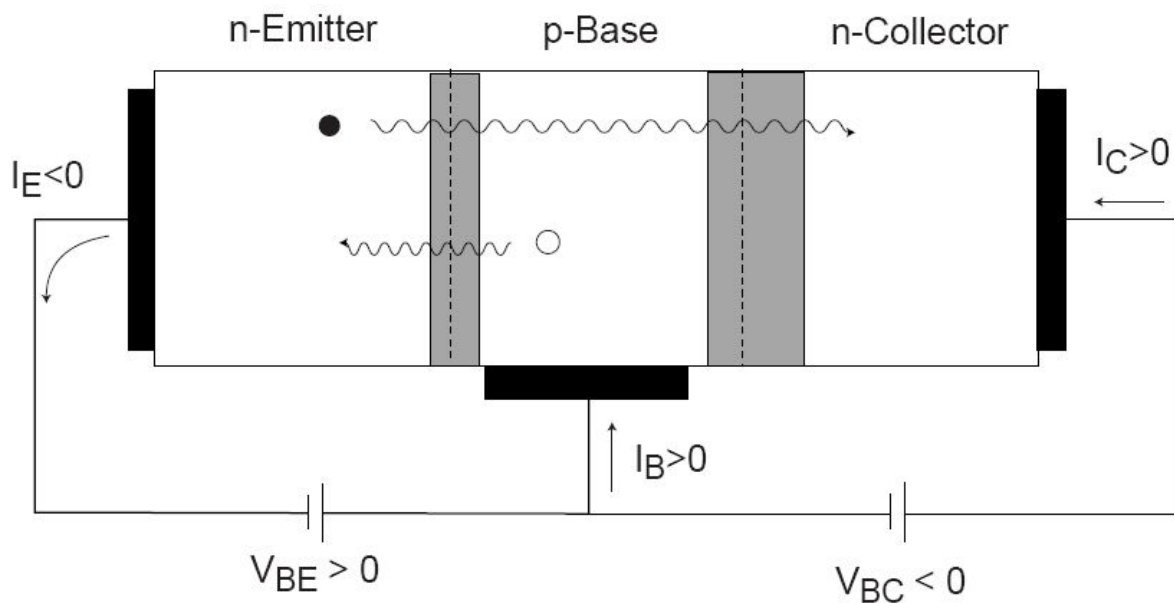
- Variaciones en β_F debido a variaciones en el ancho de la base: W_B
- Variaciones en n_i y μ debido a estrés mecánico
- Variaciones en la corriente de saturación:

$$I_S = \frac{kT A n_i^2 \bar{\mu}}{W_B N_d}$$

Se debe fundamentalmente a la dispersión en la concentración del nivel de dopantes en la base

Principales conclusiones

Corrientes del TBJ *npn* en régimen activo directo:



- El emisor “inyecta” electrones en la base,
El colector “colecta” electrones de la base.
- $\Rightarrow I_C$ es controlada por V_{BE} , independientemente de V_{BC} (*efecto transistor*):

$$I_C \propto \exp \frac{q V_{BE}}{kT}$$

- La base inyecta huecos en el emisor $\Rightarrow I_B > 0$
- Relacion entre la corriente de base y la de colector:

$$\beta_F = \frac{I_C}{I_B}$$