

Bipolar Junction Transistor

Referências Bibliográficas

SEL-EESC-USP

BJT - Introdução

· P. R. Veronese
2015

1. W. Shockley, "The Theory of p - n Junctions in Semiconductors and p - n Junction Transistor," *Bell Syst. Tech. J.*, **28**, 435, 1949.
2. B. G. Streetman, *Solid State Electronic Devices*, 4th Edition, Prentice Hall, N. Jersey, 1995, Cap. 7.
3. P. R. Gray, P. J. Hurst, S. H. Lewis, R. G. Meyer, *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*, 5th Edition, John Wiley & Sons, Inc., N. York, 2009, Cap. 1.
4. J. J. Ebers, J. L. Moll, "Large-Signal Behavior of Junction Transistor," *Proceedings of the IRE*, **42**, pp 1761-1772, 1954.
5. R. S. Muller, T. I. Kamins, *Device Electronics for Integrated Circuits*, John Wiley & Sons, New York, 1986, Caps. 6 e 7.
6. H. K. Gummel, *Proc. IRE*, **49**, 834, 1961.

Índice

Objetivos

Generalidades e Princípios de Funcionamento

BJT - Estrutura Interna

Quanto vale I_C ?

Quanto vale I_B ?

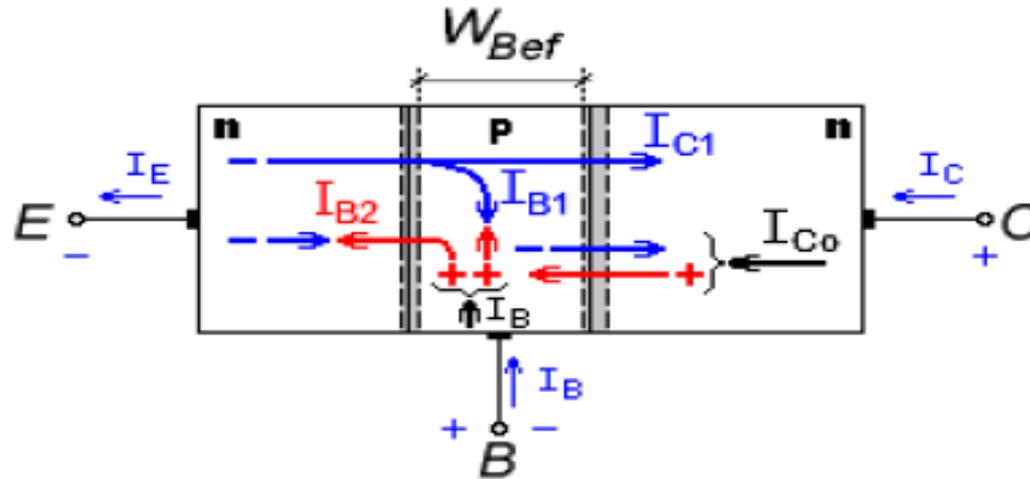
Quanto vale $\beta_F = I_C / I_B$?

Comparação entre β_F s

Quanto vale $\alpha_F = I_C / I_E$?

Conclusões Importantes sobre o BJT

Objetivos



Quanto vale I_C ?

Quanto vale I_B ?

Quanto vale I_E ?

Quanto vale $\beta_F = I_C / I_B$?

Quanto vale $\alpha_F = I_C / I_E$?

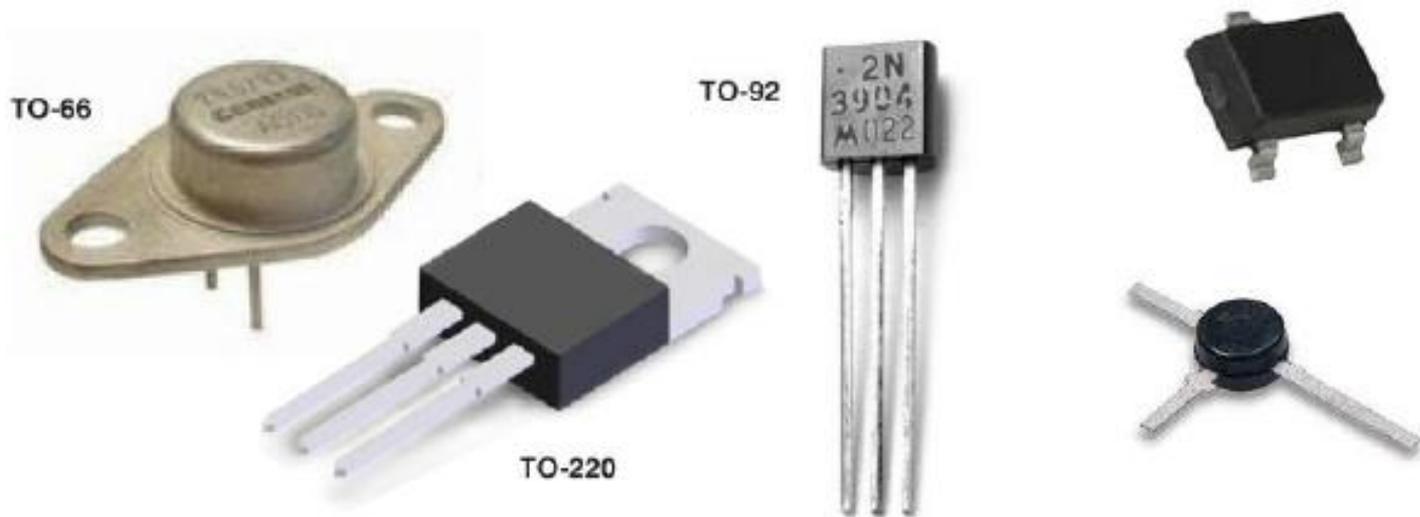
Comparação entre β_F

BJT

Generalidades e Princípios de Funcionamento

Transistor Bipolar de Junção

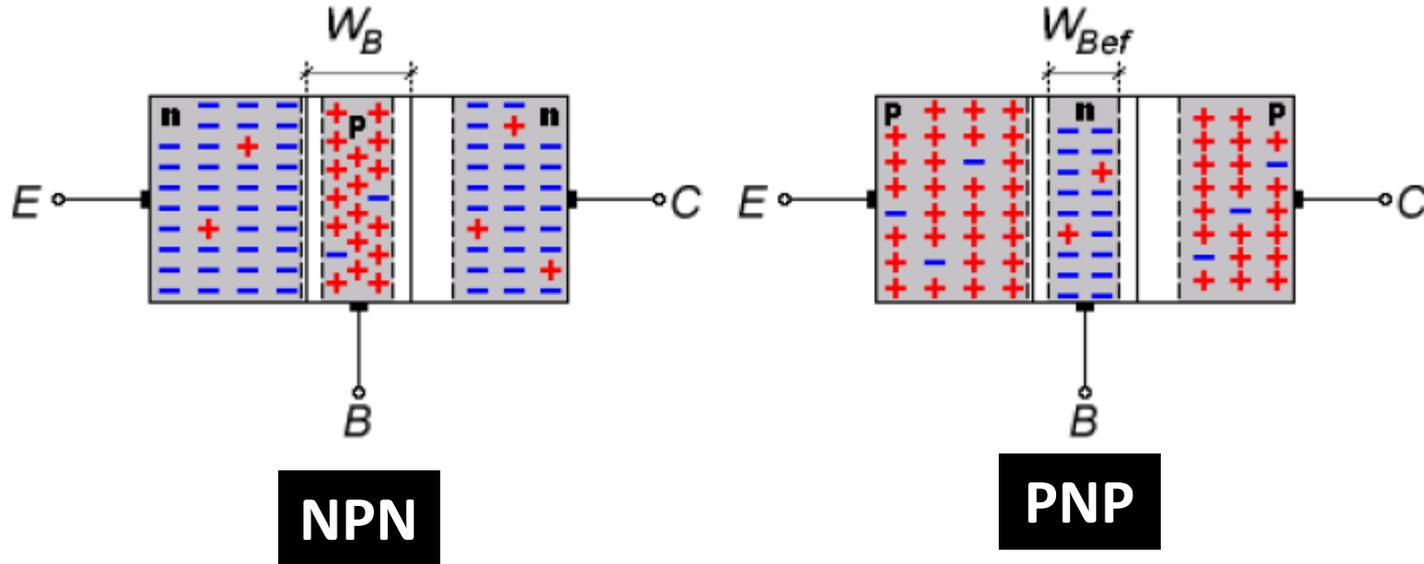
- Diversos tamanhos e encapsulamentos, conforme aplicação (limites de potência, frequência, tensão, corrente etc)



BJT

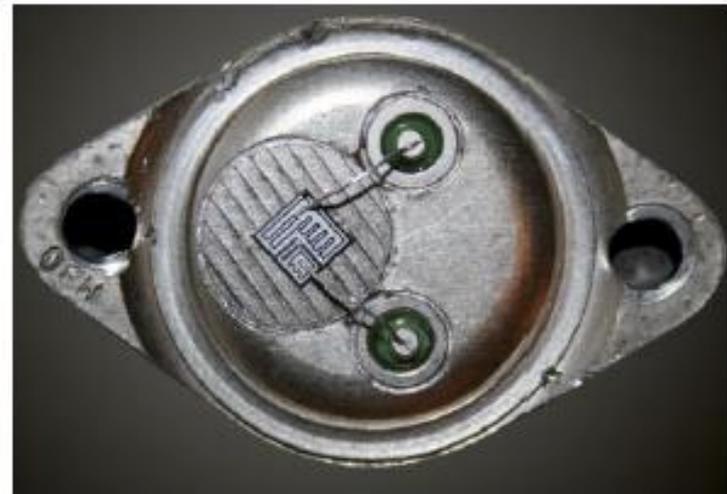
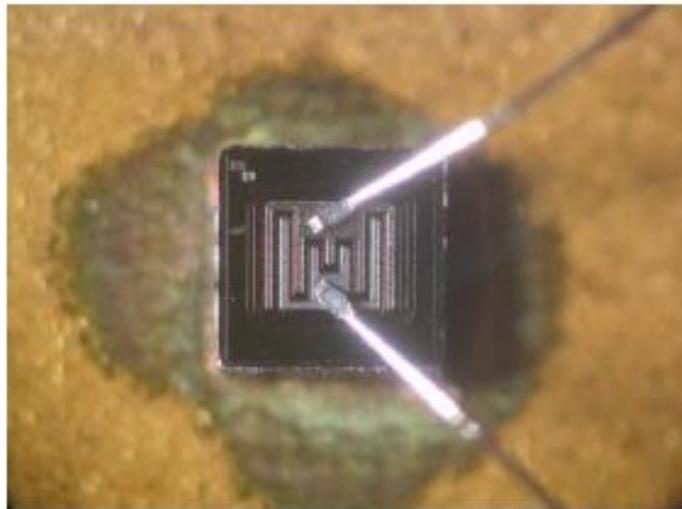
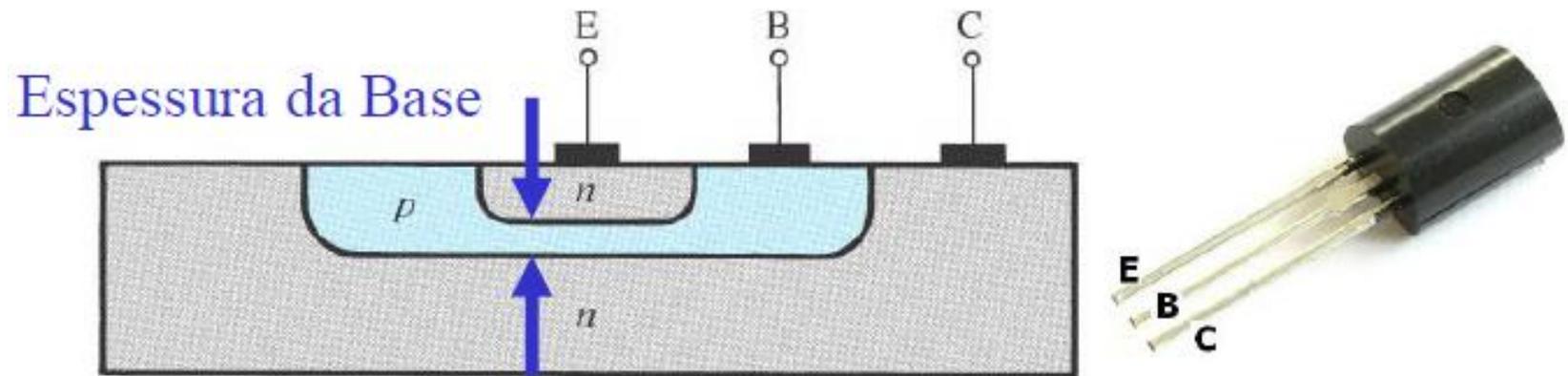
Estrutura Interna

- BJT são estruturas eletrônicas ativas constituídas de duas junções pn interdependentes.

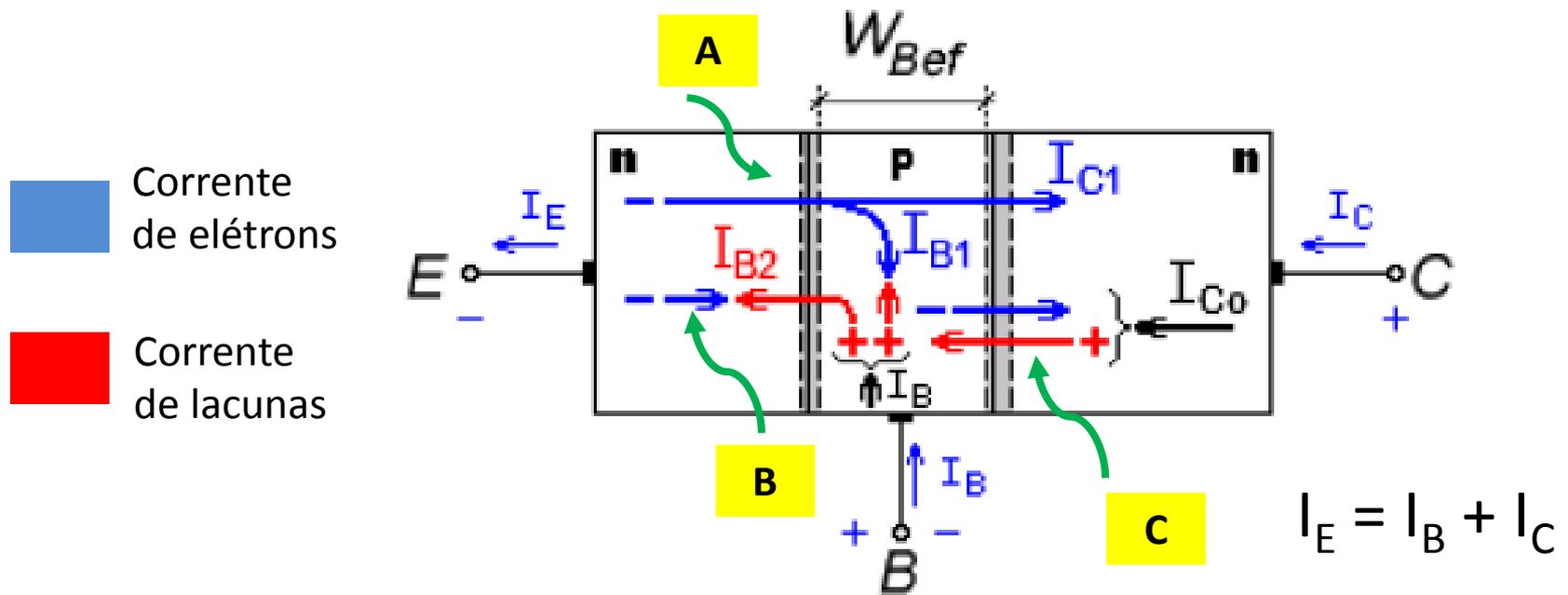


Cortes esquemáticos e simbologia do BJT

TBJ NPN – Fabricação



- As estruturas de um BJT podem ser construídas com semicondutores como o **silício**, o **germânio** ou com estruturas mistas dos tipos **SiGe** ou **SiC**.
- **Esses semicondutores devem ser adequadamente dopados com elementos químicos dos grupos III ou V**, de modo a formarem regiões do tipo p, com excesso de lacunas livres, ou do tipo n, com excesso de elétrons livres.
- Quando em contato íntimo, formam junções depletadas nas fronteiras e, portanto, retificadoras de corrente elétrica.
- **As regiões mais externas** têm, como função, **emitir** cargas livres **ou coletar** as cargas livres emitidas e, por isso, recebem os nomes de **emissor** e de **coletor**, respectivamente.
- **A região central**, chamada **base**, **controla a quantidade de emissão e de coleta dessas cargas**, variando a condutividade do dispositivo e fazendo com que a corrente entre os terminais de emissor e de coletor seja modulada por uma grandeza elétrica de controle aplicada nessa região.
- Em junções pn coexistem correntes de elétrons e de lacunas (característica bipolar).



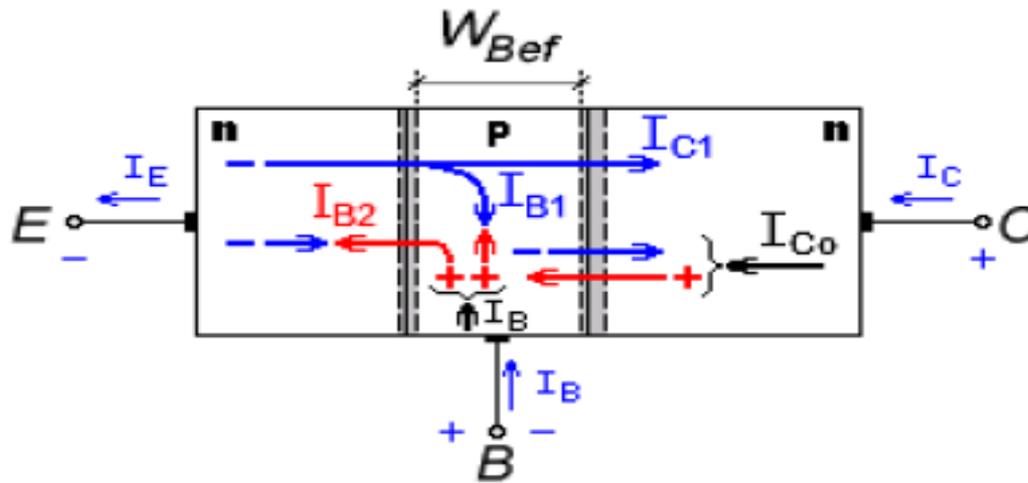
I_{B1} , I_{B2} , I_{C1} e I_{C0} tem sido real

I_E , I_B e I_C tem sido convencional

A Elétrons que vêm do emissor entram na base. A maior parte segue para o coletor e a menor parte se recombina com lacunas na base.

B Elétrons do emissor se recombinam com lacunas que vêm da base (I_{B2} .)

C $I_{C0} = \text{elétrons} + \text{lacunas}$



Quanto vale I_C ?

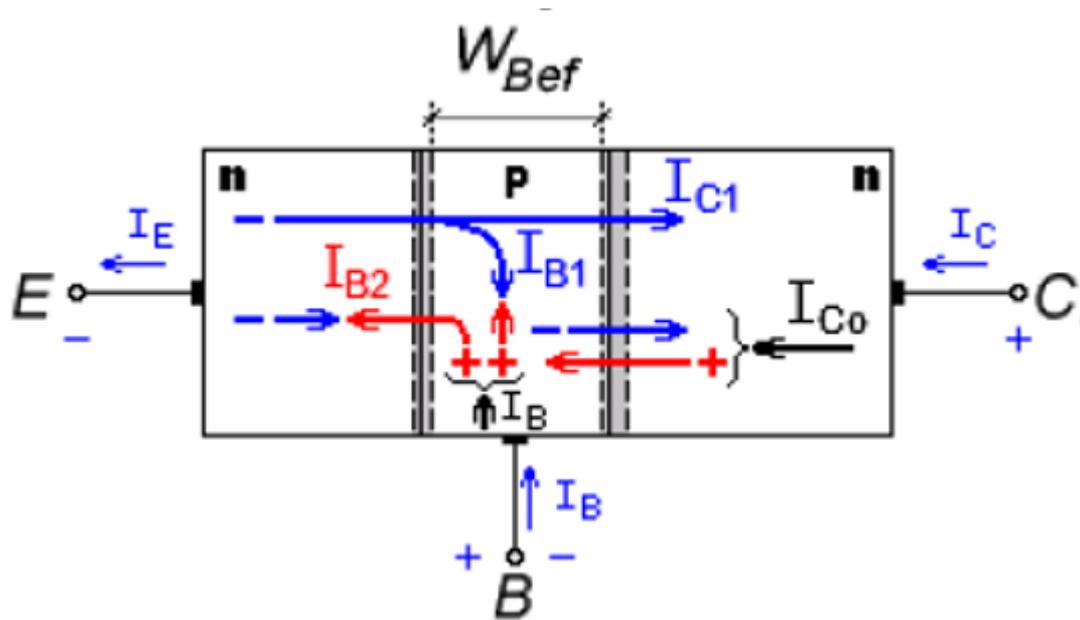
Quanto vale I_B ?

Quanto vale $\beta_F = I_C / I_B$?

Quanto vale $\alpha_F = I_C / I_E$?

Comparação entre β_F

Quanto vale I_C ?



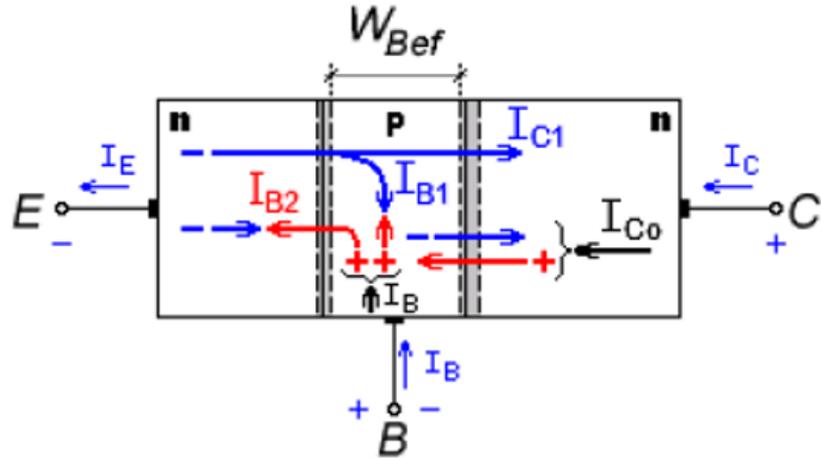
- A região de base possui largura determinada pelas fronteiras da região de cargas espaciais da base (W_{bef}) cuja dimensão é essencial na análise do funcionamento do dispositivo.
- I_{C1} é a corrente de difusão de minoritários (elétrons) pela base, gerada pela aplicação da tensão V_{BE} . **Esses minoritários serão recolhidos preferencialmente na junção reversamente polarizada B-C**, desde que o campo elétrico, nesse ponto seja elevado, isto é, $|V_{BC}| \gg |V_{BE}|$.

■ $I_n = I_{C1} + I_{B1}$ representa a corrente de difusão de minoritários (elétrons) pela base, gerada pela aplicação da tensão V_{BE} . **Esses minoritários serão recolhidos preferencialmente na junção reversamente polarizada B-C**, desde que o campo elétrico, nesse ponto seja elevado, isto é, $|V_{BC}| \gg |V_{BE}|$.

■ $I_n = I_{C1} + I_{B1}$

$I_n \approx I_{C1}$

$I_C \approx -I_{C1}$



Mostra-se que:

$$I_C \approx \frac{qA_E D_n n_i^2}{N_A W_{Bef}} \times \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_t}} - 1 \right) = \frac{qA_E D_n n_i^2}{Q_B} \times \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_t}} - 1 \right) \quad [A]$$

➔

$$I_C = I_S \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_t}} - 1 \right)$$

$$I_C \approx \frac{q A_E D_n n_i^2}{N_A W_{Bef}} \times \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_t}} - 1 \right) = \frac{q A_E D_n n_i^2}{Q_B} \times \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_t}} - 1 \right)$$

[A]

D_n [cm^2/s] - constante de difusão de elétrons na base

N_A [cm^{-3}] - concentração de dopantes na base

$n_i \approx 1,45 \times 10^{10}$ [cm^{-3}] @ 27°C - concentração intrínseca do Si

A_E [cm^2] - área seccional de emissor

q [C] - carga do elétron

$V_t = kT/q$ [V] - potencial térmico

W_{Bef} [cm] - largura efetiva da base

$$I_c = I_s \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_t}} - 1 \right)$$

NPN

$$I_s = \frac{qA_E \bar{D}_n n_i^2}{N_a W_{Bef}} = \frac{qA_E \bar{D}_n n_i^2}{Q_B} \quad [\text{A}] \quad 0,1 \text{ fA} \leq I_s \leq 10 \text{ fA}$$

\bar{D}_n [cm²/s] - valor médio da constante de difusão de elétrons na base
 N_a [cm⁻³] - concentração de dopantes, considerada uniforme, na base
 $n_i \approx 1,45 \times 10^{10}$ [cm⁻³] @ 27°C - concentração intrínseca do Si
 A_E [cm²] - área seccional de emissor
 q [C] - carga do elétron
 $V_t = kT/q$ [V] - potencial térmico
 W_{Bef} [cm] - largura efetiva da base

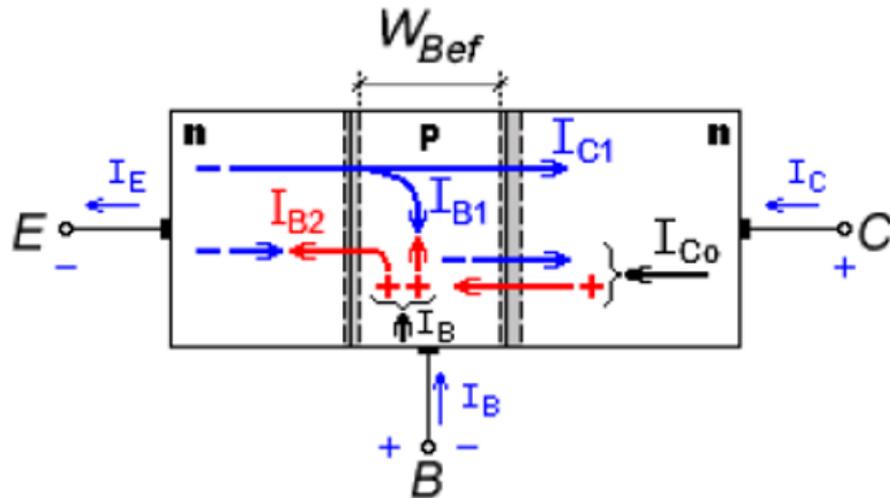
$$I_c = I_s \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_t}} - 1 \right)$$

$$I_s = \frac{qA_E \bar{D}_p n_i^2}{N_d W_{Bef}} = \frac{qA_E \bar{D}_p n_i^2}{Q_B} \quad [\text{A}] \quad 0,1 \text{ fA} \leq I_s \leq 10 \text{ fA}$$

\bar{D}_p [cm²/s] - valor médio da constante de difusão de lacunas na base
 N_d [cm⁻³] - concentração de dopantes, considerada uniforme, na base
 $n_i \approx 1,45 \times 10^{10}$ [cm⁻³] @ 27°C - concentração intrínseca do silício
 A_E [cm²] - área seccional de emissor
 q [C] - carga do elétron
 $V_t = kT/q$ [V] - potencial térmico
 W_{Bef} [cm] - largura efetiva da base

PNP

Quanto vale I_B ?



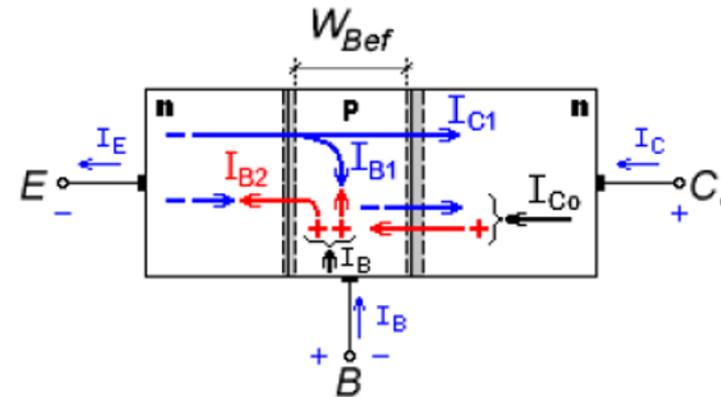
I_{B1} representa a corrente de recombinação de elétrons injetados pelo emissor e recombinados na base

I_{B2} representa a corrente de recombinação de lacunas injetadas pela base e recombinadas no emissor.

I_{B1} representa a corrente de recombinação de elétrons injetados pelo emissor e recombinados na base

Mostra-se que:

$$I_{B1} = -\frac{qA_E n_{po} W_{Bef}}{2\tau_B} \times \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_t}} - 1 \right) \quad [\text{A}]$$



A_E [cm^2] - área seccional de emissor

q [C] - carga do elétron

$V_t = kT/q$ [V] - potencial térmico

n_{po} - concentração de elétrons minoritários no lado p

W_{BeF} - largura de base efetiva

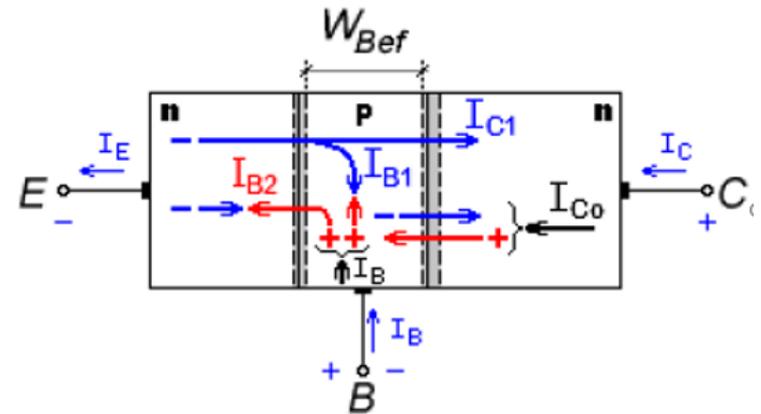
τ_B (s) - tempo de vida de minoritários (elétrons) na base

Para transistores convencionais usados em circuitos integrados, a parcela I_{B1} da corrente de base é pequena comparada à parcela I_{B2} .

I_{B2} representa a corrente de recombinação de lacunas injetadas pela base e recombinadas no emissor.

Mostra-se que:

$$I_{B2} = \frac{qA_E D_p n_i^2}{L_p N_d} \times \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_t}} - 1 \right) \quad [A]$$



D_p [cm²/s] é a constante de difusão de lacunas no emissor

N_d [cm⁻³] é a concentração de dopantes, considerada uniforme, no emissor

$n_i \approx 1,45 \times 10^{10}$ [cm⁻³] @ 27°C é a concentração intrínseca do silício

A_E [cm²] é a área seccional de emissor

q [C] é a carga do elétron

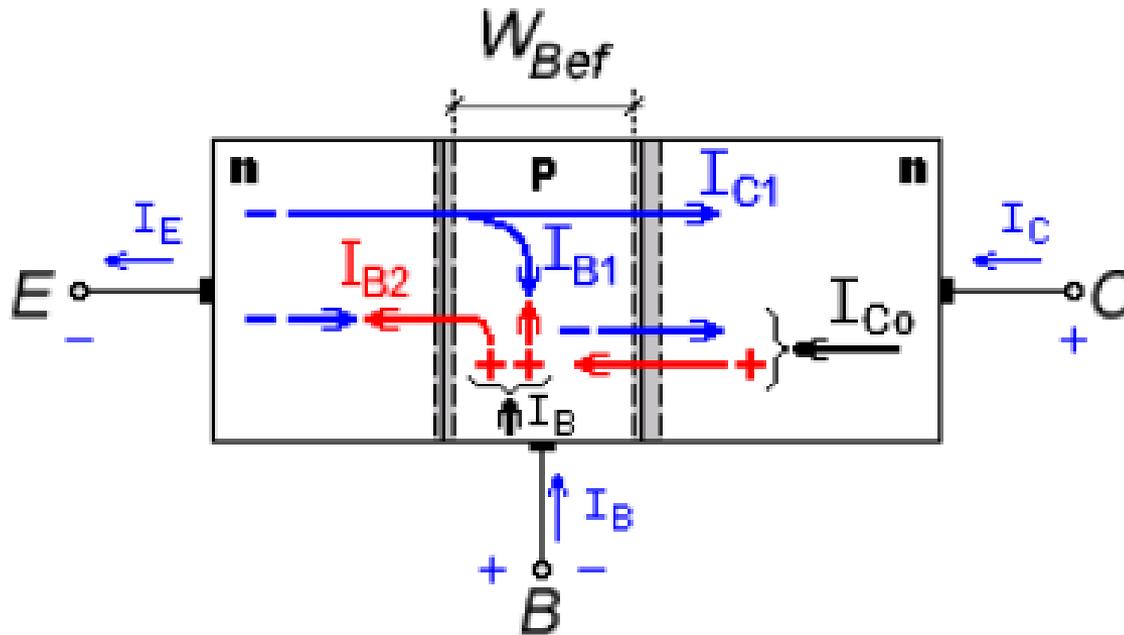
$V_t = kT/q$ [V] é o potencial térmico

L_p [cm] é o comprimento de difusão de lacunas no emissor.

■ A corrente total de base (I_B) vale, portanto:

$$I_B = I_{B2} - I_{B1} = qA_E n_i^2 \times \left(\frac{W_{Bef}}{2\tau_B N_a} + \frac{D_p}{L_p N_d} \right) \times \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_i}} - 1 \right) \quad [\text{A}]$$

Quanto vale $\beta_F = I_C / I_B$?



β_F é o ganho direto de corrente

$$I_C \approx \frac{qA_E D_n n_i^2}{N_A W_{Bef}} \times \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_t}} - 1 \right) = \frac{qA_E D_n n_i^2}{Q_B} \times \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_t}} - 1 \right)$$

$$I_B = I_{B2} - I_{B1} = qA_E n_i^2 \times \left(\frac{W_{Bef}}{2\tau_B N_a} + \frac{D_p}{L_p N_d} \right) \times \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_t}} - 1 \right)$$

Pela divisão I_C e I_B obtém-se β_F :

$$\beta_F = \frac{\frac{qA_E D_n n_i^2}{N_a W_{Bef}}}{qA_E n_i^2 \times \left(\frac{W_{Bef}}{2\tau_B N_a} + \frac{D_p}{L_p N_d} \right)} = \frac{\frac{D_n}{N_a W_{Bef}}}{\frac{W_{Bef}}{2\tau_B N_a} + \frac{D_p}{L_p N_d}}$$

$$\beta_F = \frac{1}{\frac{W_{Bef}^2}{2\tau_B D_n} + \frac{D_p}{D_n} \times \frac{W_{Bef}}{L_p} \times \frac{N_a}{N_d}}$$

NPN

$$\beta_F = \frac{1}{\frac{W_{Bef}^2}{2\tau_B D_p} + \frac{D_n}{D_p} \times \frac{W_{Bef}}{L_n} \times \frac{N_d}{N_a}}$$

PNP

$$\beta_F = \frac{1}{\frac{W_{Bef}^2}{2\tau_B D_n} + \frac{D_p}{D_n} \times \frac{W_{Bef}}{L_p} \times \frac{N_a}{N_d}}$$

NPN

$$\beta_F = \frac{1}{\frac{W_{Bef}^2}{2\tau_B D_p} + \frac{D_n}{D_p} \times \frac{W_{Bef}}{L_n} \times \frac{N_d}{N_a}}$$

PNP

D_n [cm²/s] - constante de difusão de elétrons no emissor

D_p [cm²/s] - constante de difusão de lacunas na base

N_d [cm⁻³] - concentração de dopantes, considerada uniforme, na base

N_a [cm⁻³] - concentração de dopantes, considerada uniforme, no emissor

L_p [cm] - comprimento de difusão de buracos no emissor

L_n [cm] - comprimento de difusão de elétrons no emissor

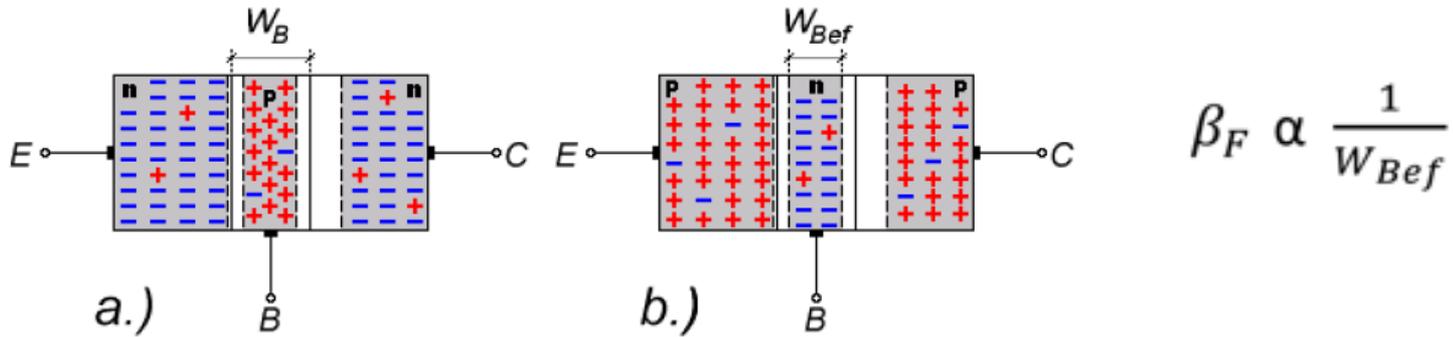
τ_B [s] - tempo de vida de minoritários (elétrons) na base

W_{Bef} [cm] - largura efetiva de base

Conclusões

Importantes sobre o BJT

- 1 A largura efetiva da base (W_{Bef}) é um fator primordial no dimensionamento do β_F do transistor.



- 2 As densidades de dopagem na base e no emissor também influenciam no β_F do transistor. Para que β_F seja maximizado, a concentração de dopantes no emissor deve ser muito maior do que a concentração de dopantes na base.

NPN \longrightarrow $N_d \gg N_a$

PNP \longrightarrow $N_a \gg N_d$

Por essa razão, os **transistores reais** são construídos com **emissores superdopados** e com **bases fraca ou medianamente dopadas**.

Os transistores reais possuem, portanto, **estruturas do tipo n^+pn^-** ou do **tipo p^+np^-** e não são, conseqüentemente, simétricos.

3

Transistores **npn convencionais de circuitos integrados** possuem ganhos diretos de corrente na faixa $50 \leq \beta_F \leq 500$.

Dispositivos discretizados, npn ou pnp, possuem esses ganhos na faixa $100 \leq \beta_F \leq 900$.

4

O ganho direto de corrente também pode ser escrito, conforme referência [2]:

$$\beta_F = \frac{\tau_B}{\tau_T} \quad (12)$$

τ_B é o **tempo médio de vida do minoritário na base** e τ_T , chamado de **tempo de transito**, é o tempo que o minoritário, injetado pelo emissor, demora para cruzar a base e alcançar o coletor.

2. B. G. Streetman, *Solid State Electronic Devices*, 4th Edition, Prentice Hall, N. Jersey, 1995, Cap. 7.

5

Em bases muito estreitas, o tempo de trânsito (τ_T) cai e, portanto, β_F aumenta.

6

Em bases fracamente dopadas, o tempo médio de vida dos minoritários nessa região cresce e, portanto, β_F aumenta, **comprovando a necessidade de bases estreitas e fracamente dopadas para transistores de β_F elevado**.

Comparação entre β_F

Sejam $\beta_F^{\text{`}}$, $\beta_F^{\text{``}}$ e $\beta_F^{\text{'''}}$ os ganhos de corrente de transistores de áudio, de chaveamento e de potência, respectivamente:

- Transistores de áudio tem base estreita e são fracamente dopados.
- Transistores de chaveamento tem base estreita e são fortemente dopados.

$$\beta_F^{\text{``}} < \beta_F^{\text{`}}$$

- Transistores de potência tem base larga

$$\beta_F^{\text{'''}} < \beta_F^{\text{`}}$$

Código de transistores BJT europeus:

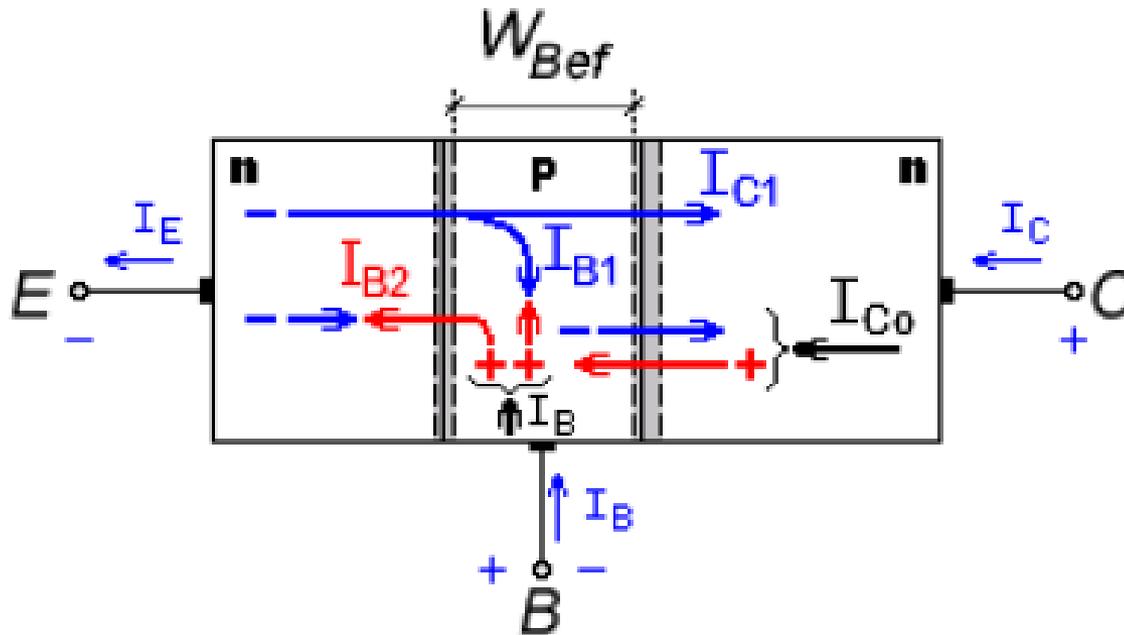
BC - áudio

BF - rádio frequência

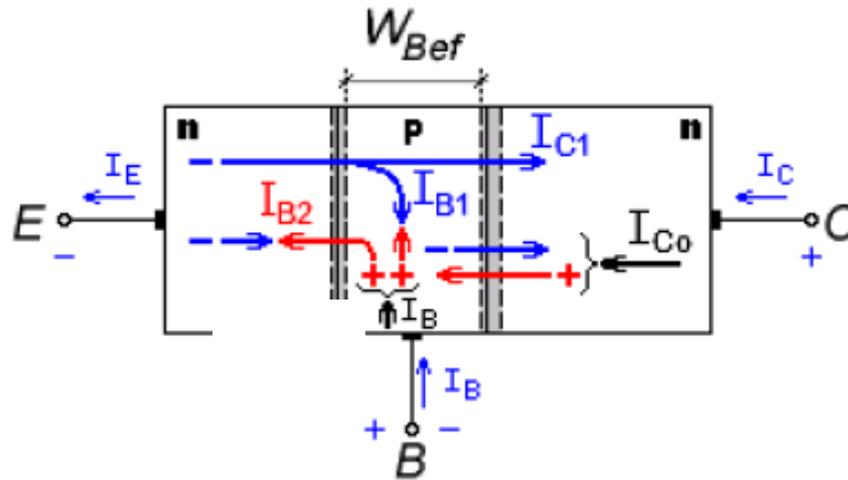
BY ou **BW** – chaveamento

BD - potência

Quanto vale $\alpha_F = I_C / I_E$?



A corrente total de coletor inclui uma **componente de fuga reversa na junção B-C, chamada de I_{co}** (figura abaixo), desprezível em temperatura ambiente. Desprezando-se I_{co} e analisando-se o esquema da figura conclui-se que:



$$I_E = I_C + I_B$$

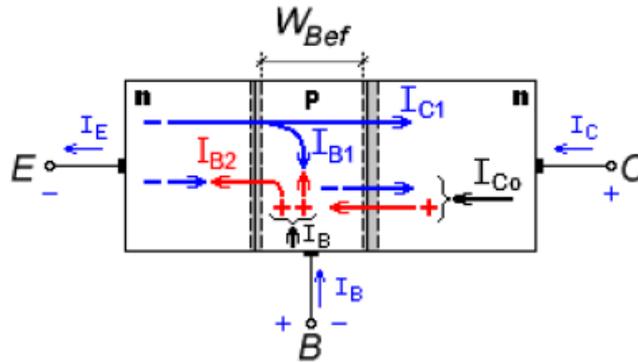


$$I_C + I_C / \beta_F$$



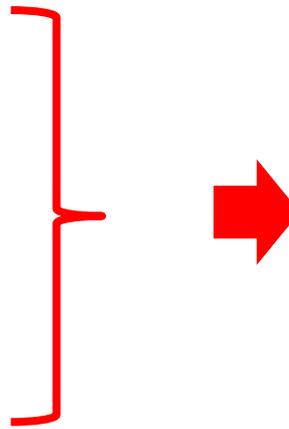
$$\left\{ \begin{array}{l} I_E = I_C / \alpha_F \\ \alpha_F = \frac{\beta_F}{\beta_F + 1} \end{array} \right.$$

NPN



$$\alpha_F = \frac{\beta_F}{\beta_F + 1}$$

$$\beta_F = \frac{1}{\frac{W_{Bef}^2}{2\tau_B D_n} + \frac{D_p}{D_n} \times \frac{W_{Bef}}{L_p} \times \frac{N_a}{N_d}}$$



$$\alpha_F = \alpha_T \gamma$$

$$\alpha_T = \frac{2\tau_B D_n}{2\tau_B D_n + W_{Bef}^2}$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_p}{D_n} \times \frac{W_{Bef}}{L_p} \times \frac{N_a}{N_d}}$$

$$\alpha_F = \alpha_T \gamma$$

$$\alpha_T = \frac{2\tau_B D_n}{2\tau_B D_n + W_{Bef}^2}$$



A grandeza α_T , chamada de **fator de transporte de base**, representa a razão entre as cargas que alcançam o coletor e as cargas injetadas na base pelo emissor.

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_p}{D_n} \times \frac{W_{Bef}}{L_p} \times \frac{N_a}{N_d}}$$



A grandeza γ , chamada de **eficiência de injeção de emissor**, representa a razão entre a corrente de minoritários injetados na base pelo emissor e a corrente total (elétrons + lacunas) que cruza a junção B-E.

■ Idealmente $\gamma \rightarrow 1$, se $W_{Bef} \ll L_p$ e $N_d \gg N_a$

■ Idealmente $\alpha_T \rightarrow 1$ e conseqüentemente $\alpha_F \rightarrow 1$ se W_{Bef} for muito pequeno