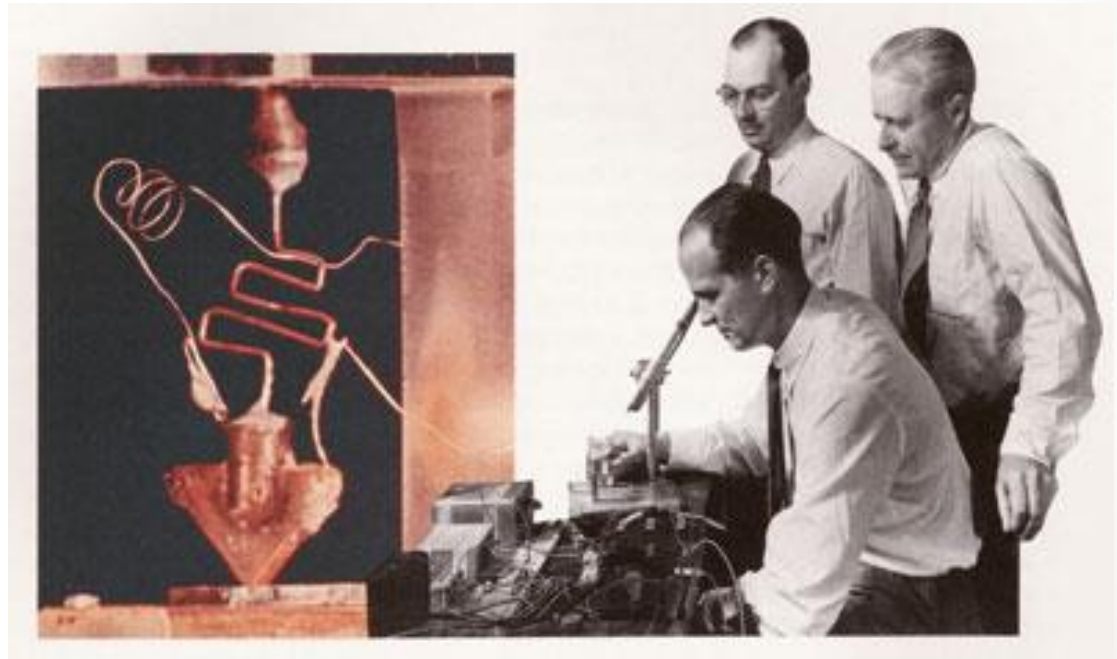


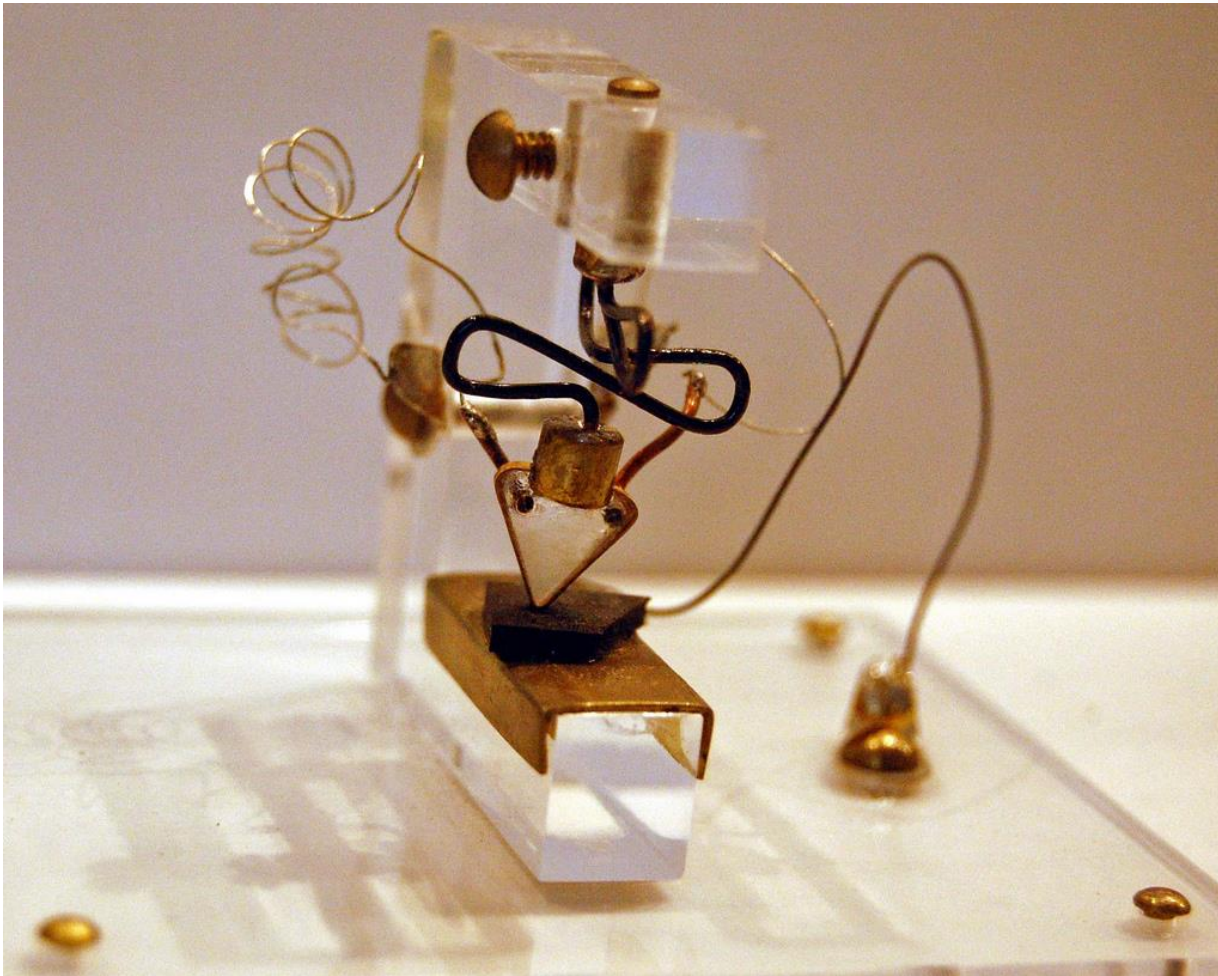
EN2719

Dispositivos Eletrônicos

O Transistor Bipolar



Prof. Carlos Reis
Sala:705-1-A



Réplica do primeiro transistor.
O transistor de contato de ponto foi inventado por John Bardeen e Walter Brattain em nov/1947.

Introdução

O **transistor bipolar** é um dispositivo feito de material semicondutor que tem três terminais, no qual verifica-se a passagem de corrente elétrica de um terminal para o outro, sendo o fluxo desta corrente controlado através do terceiro terminal.

Dentre as inúmeras aplicações do transistor bipolar, destacam-se a amplificação de sinais elétricos, como tensão e corrente e o chaveamento destes sinais. Em aplicações digitais, o transistor é utilizado na implementação de portas lógicas.

Como sua estrutura consiste de duas junções PN é possível a implementação de dois tipos de transistores bipolares: o NPN e o PNP, cujas estruturas básicas e símbolos são mostrados na Fig-1.

Os terminais de um transistor bipolar são chamados de **Coletor**, **Base** e **Emissor**.

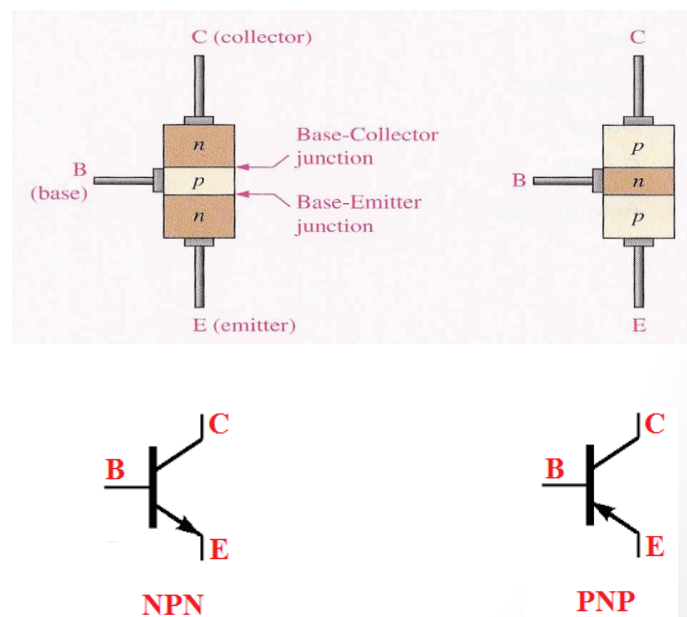
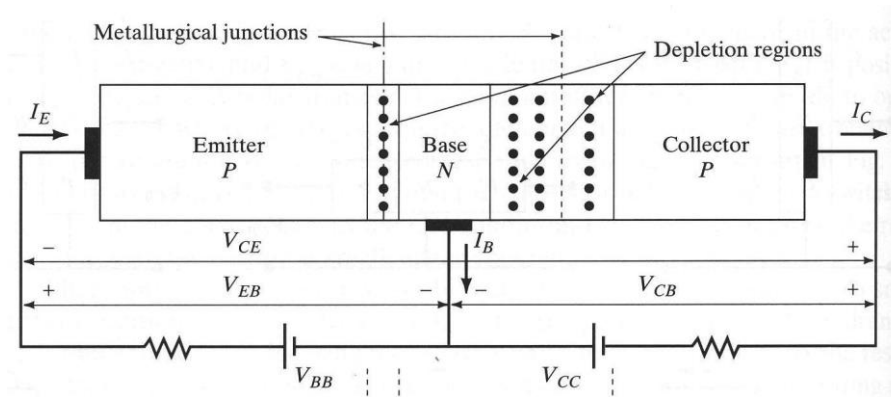


Fig-1

Analisemos as correntes nos três terminais do transistor (PNP), considerando a situação em que a junção Emissor-Base está diretamente polarizada e a junção Coletor-Base está inversamente polarizada.

Assim, teremos três correntes: A corrente de emissor, I_E , a corrente de Coletor, I_C e a corrente de base, I_B .

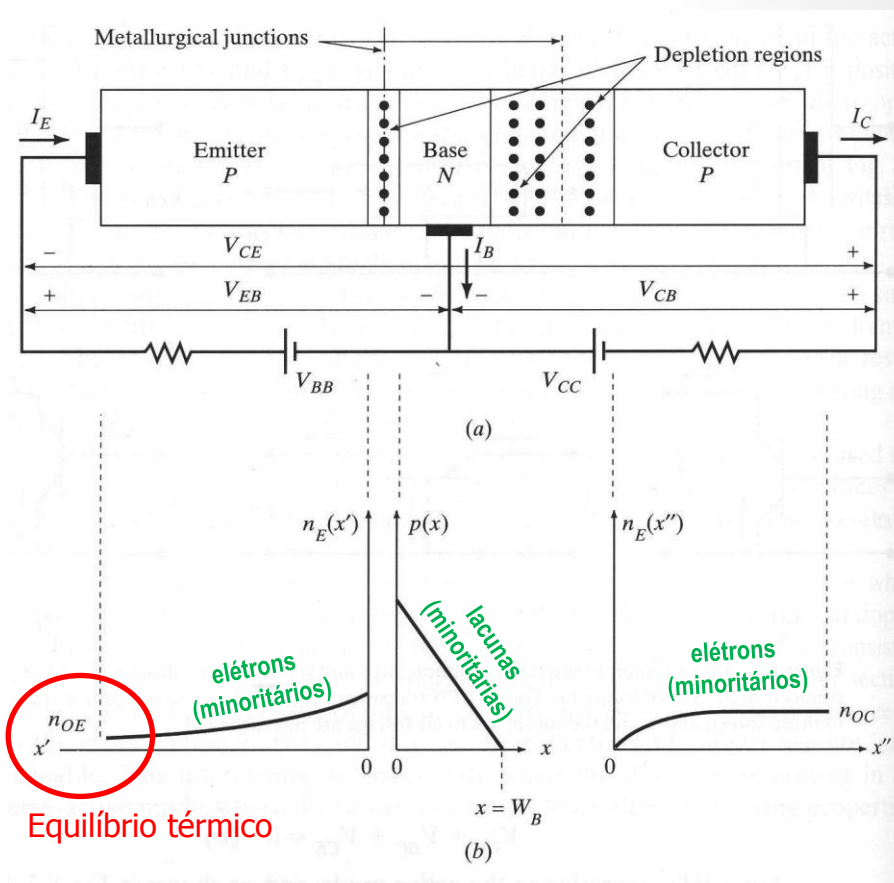


Corrente de Emissor

Para a junção Emissor-Base diretamente polarizada, as lacunas, que são majoritárias no emissor, migram para a base, por difusão, e os elétrons, que são majoritários na base, migram, por difusão, para o emissor. A soma destas duas correntes forma a corrente de emissor. Portanto:

$$I_E = I_{Ep} + I_{En} \quad \left\{ \begin{array}{l} I_{Ep} = \text{corrente de lacunas (difusão do emissor} \rightarrow \text{base)} \\ I_{En} = \text{corrente de elétrons (difusão da base} \rightarrow \text{emissor)} \end{array} \right.$$

Os elétrons que atravessam da base para o emissor e que formam a corrente I_{En} recombinaem com as lacunas do emissor. Normalmente, a densidade de elétrons na junção do emissor com o metal (contato externo) tem um valor que corresponde ao equilíbrio térmico (n_{OE}). Neste contato Emissor-Metal, os elétrons são “empurrados” para fora do contato pela diferença de potencial DC V_{BB} .



Algumas lacunas, das que são majoritárias no emissor, recombinaem com elétrons que chegam no emissor vindo da base. A maior parte das lacunas, no entanto, entra (é injetada) na base simplesmente porque a barreira de potencial foi abaixada pela polarização direta aplicada na junção.

Corrente de Coletor

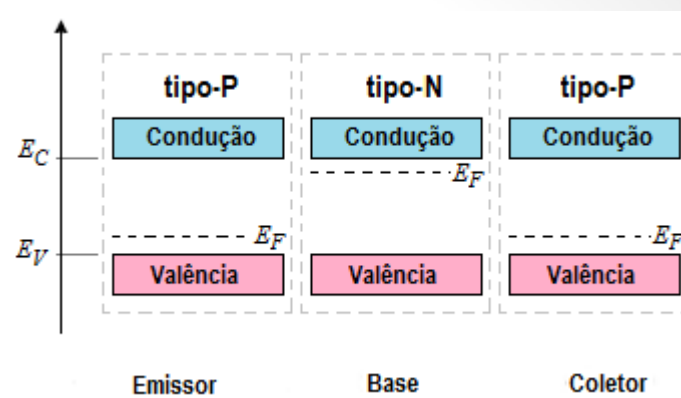
As lacunas do emissor que são injetadas na base têm duas opções:

- Se a largura da base é muito maior do que o comprimento de difusão das lacunas – que depende do tempo de vida das lacunas, agora como portadores minoritários na base – então, todas as lacunas recombinarão na base.
- Se, por outro lado, a largura da base é muito menor do que o comprimento de difusão das lacunas, então a grande maioria das lacunas atravessa a base e atinge a região da junção Base-Coletor que está inversamente polarizada.

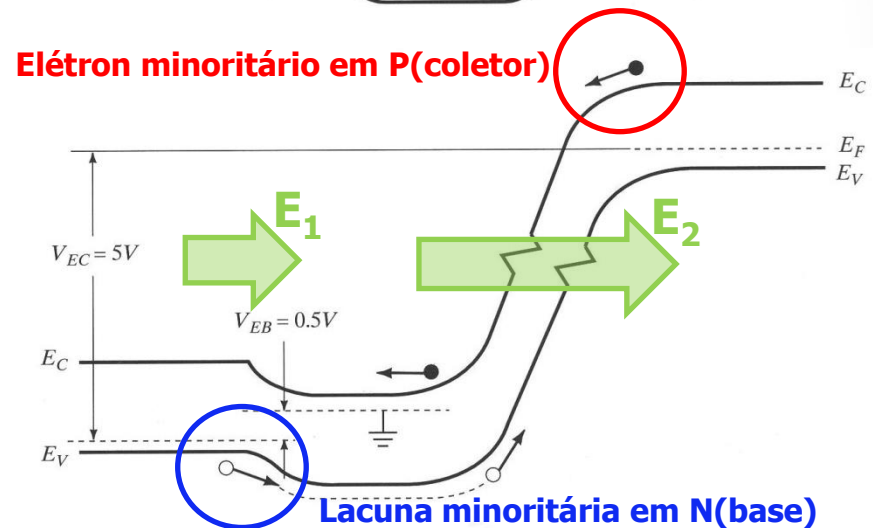
A primeira opção faz com que o transistor mais se pareça com dois diodos conectados em condições opostas de condução, pois não ocorre nenhuma interação entre o emissor e o coletor.

A segunda opção, por outro lado, configura uma situação na qual as lacunas que têm origem no emissor atravessam a base e contribuem para a formação da corrente de coletor.

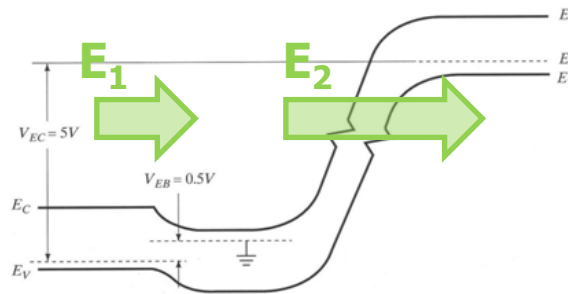
Em equilíbrio térmico e sem polarizar as junções, verifica-se o diagrama de nível-de-energia ao lado: Quando as três regiões (P, N e P) se juntam, os níveis de Fermi dos materiais se alinham.



O diagrama de nível-de-energia se modifica quando as junções são polarizadas. No caso, são aplicadas as tensões externas: $V_{EB}=0,5V$ (direta) e $V_{CB}=5V$ (inversa)



Considerando a segunda opção comentada anteriormente, as lacunas vindas do emissor atravessam a junção Base-Coletor e chegam ao coletor porque o campo elétrico intenso nesta junção, que está inversamente polarizada, é favorável à travessia dos portadores minoritários!



A polarização inversa na junção Base-Coletor alarga a região de depleção. Os portadores nesta região se devem à geração térmica e logo que surgem são imediatamente varridos para fora pelo campo elétrico. Assim, as lacunas que são injetadas do emissor e que atravessam a base, se juntam às lacunas geradas na região de depleção (Base-Coletor) e chegam ao coletor.

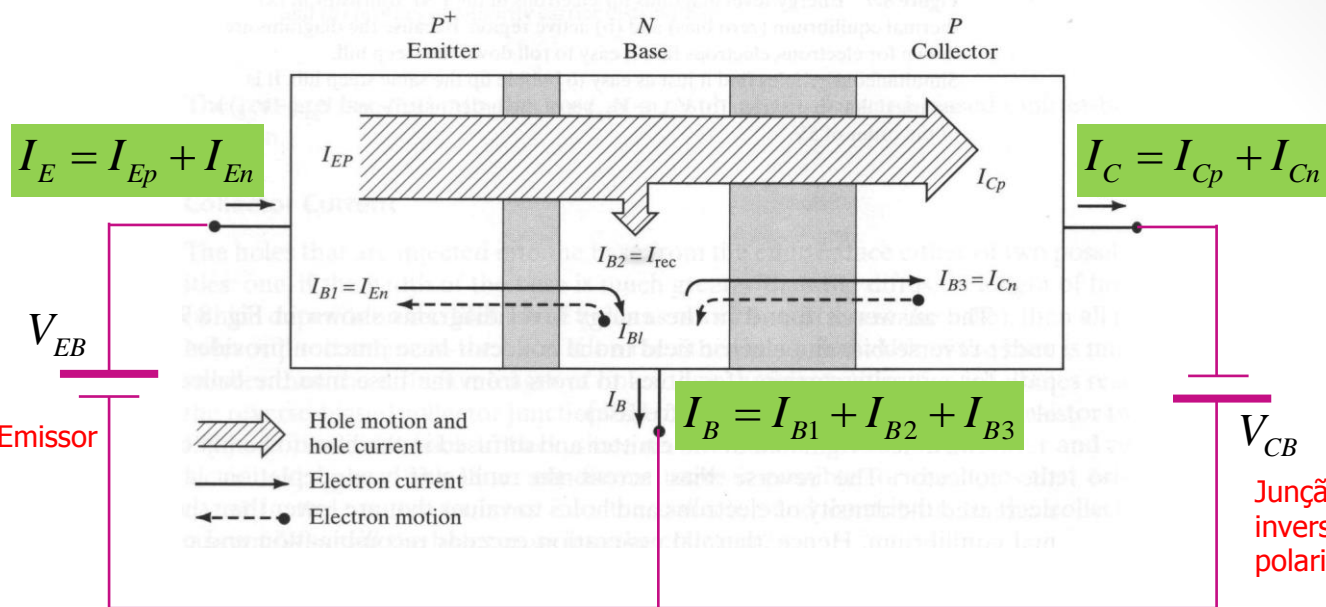
Os elétrons gerados na região de depleção da junção Base-Coletor se deslocam em direção à base (onde são portadores majoritários de excesso), constituindo uma "corrente de fuga".

Temos então que a corrente de coletor é formada por dois componentes:

$$I_C = I_{Cp} + I_{Cn}$$

A componente I_{Cp} é formada pelas lacunas que têm origem no emissor e I_{Cn} é a componente formada pelos elétrons comentada anteriormente.

Junção Base-Emissor
diretamente
polarizada



Junção Coletor-Base
inversamente
polarizada

Corrente de Base

A corrente de base consiste de três componentes. A primeira componente, I_{B1} , é a componente da corrente de emissor I_{En} formada pelos elétrons que difundem da base para o emissor.

A segunda componente, I_{B2} , se deve ao deslocamento de elétrons que vêm do terminal (metal) de base e entram na base para recombinar com algumas lacunas que vêm do emissor e também entram na base.

A terceira componente, I_{B3} , é formada pelos elétrons que migram do coletor para a base. Assim, a corrente de base é dada por:

$$I_B = I_{B1} + I_{B2} + I_{B3}$$

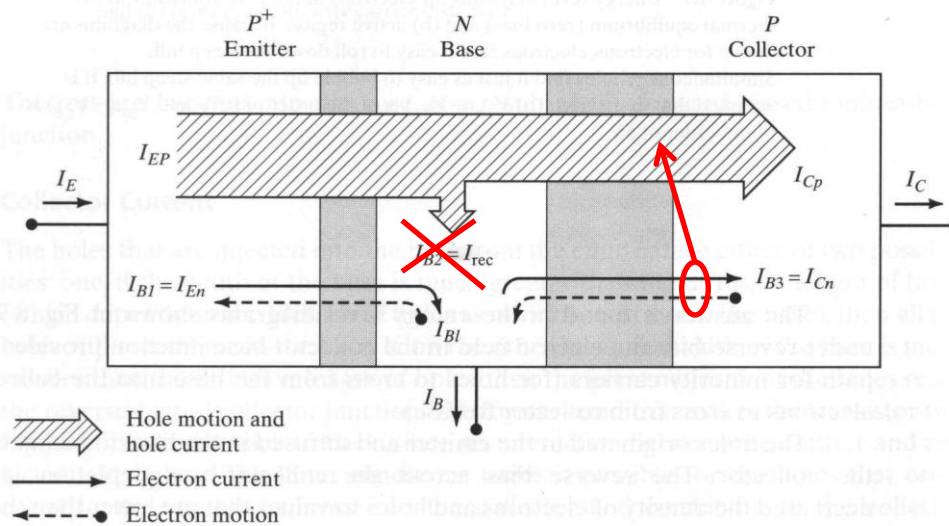
O transistor bipolar como amplificador de corrente

Com base nas considerações anteriores foi possível demonstrar que quando um transistor bipolar opera com a junção Base-Emissor diretamente polarizada e a junção Coletor-Base inversamente polarizada, se verificam cinco correntes distintas. Para o transistor PNP, que foi abordado até aqui, temos:

Primeiro, a corrente das lacunas que difundem do emissor para a base, constituindo a componente predominante da corrente de emissor.

Depois, há a corrente das lacunas que atravessam a base, constituindo praticamente toda a corrente de coletor.

Finalmente, vimos que existem três componentes da corrente de base. Uma destas componentes se deve aos elétrons que são injetados da base no emissor (I_{B1}), a componente (I_{B2}), que se deve aos elétrons oriundos do contato metálico da base recombinação com algumas das lacunas que tentam atravessar a base e a componente (I_{B3}) que consiste da geração térmica na região de depleção da junção Coletor-Base, que contribui com o envio de elétrons para a base e, simultaneamente, de lacunas para o coletor.



Para simplificar o tratamento das correntes em um transistor bipolar, podemos considerar que a corrente de base tem apenas duas componentes, se admitirmos que a componente (I_{B3}) da corrente de base tenha sua parcela de elétrons agregada à de elétrons da base que difundem para o emissor e a de lacunas, agregada às lacunas que atravessam a base em direção ao coletor!

A simplificação pode ser ainda maior, e considerarmos que a corrente de base tem uma única componente, se levarmos em conta que as larguras de base dos transistores construídos atualmente são tão pequenas que a recombinação na base possa ser desprezada.

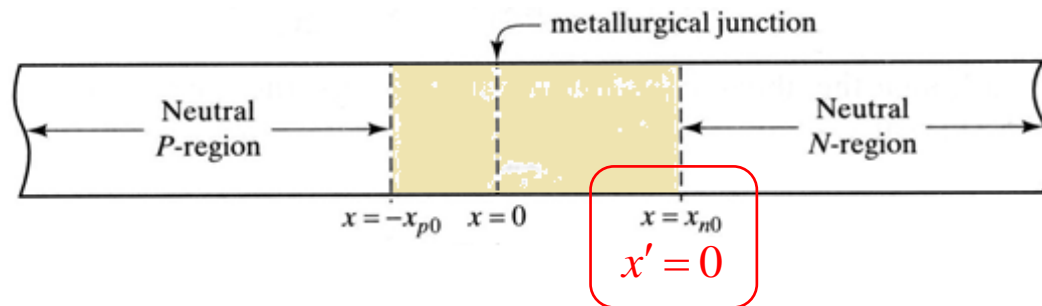
Portanto, limitamos a corrente efetiva de base à corrente dos elétrons que são injetados no emissor.

A corrente de base, considerada neste ponto como sendo unicamente formada por I_{B1} , é da ordem de 1% da corrente de coletor do transistor. Apesar da sua pequena amplitude, sua importância deve ser ressaltada porque desempenha o papel de variável de controle em algumas aplicações do transistor.

Esta consideração de que a largura da base é tão pequena que praticamente não ocorre recombinação na base tem a seguinte consequência no equacionamento do transistor .

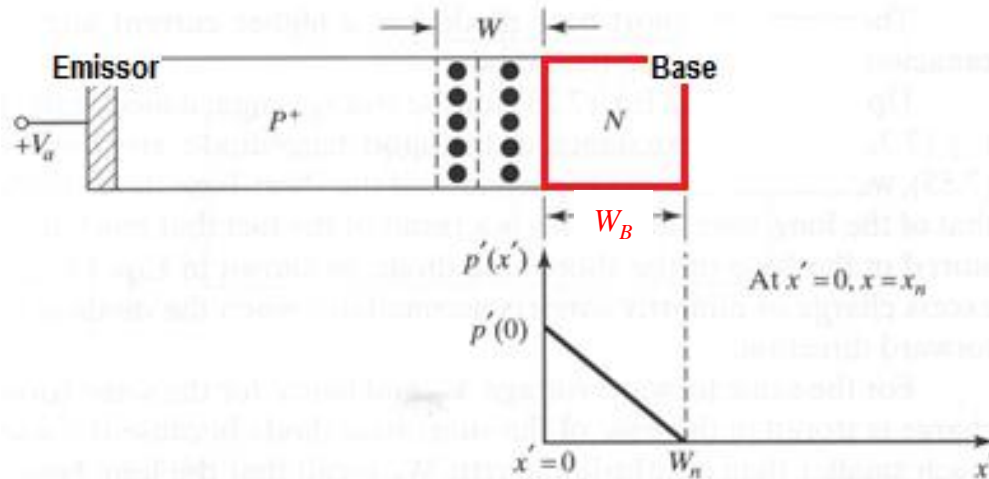
Conforme visto anteriormente, a densidade de lacunas em uma junção PN, na qual a largura da região-N é muito menor do que o comprimento de difusão das lacunas, é dada por:

$$p' = p - p_{0n} = p_{0n} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \left(1 - \frac{x'}{W_n} \right) \quad \text{Para } W_n \ll L_p$$



Observe que este é exatamente o caso da junção Base-Emissor de um transistor contemporâneo: A largura de base é muito menor que o comprimento de difusão das lacunas. Esta mesma consideração é válida para um transistor NPN (naturalmente, trocando elétrons por lacunas e vice-versa).

Como consequência da aproximação anterior, a distribuição dos portadores em excesso (lacunas na base) tem um perfil linear.



$$p'(x') = p - p_{0n} = p_{0n} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \left(1 - \frac{x'}{W_n} \right)$$

Conforme visto no slide-10 da Aula-3. Neste caso, como a região-N é a base, a densidade de lacunas p_{0n} está sendo denominada p_{0B} . Pela mesma razão, W_n está sendo denominada W_B .

Como o gradiente de concentração de lacunas é constante ao longo da base, a corrente na junção, que é a corrente de emissor, é dada pela corrente de difusão das lacunas.

$$I_{Ep} = -qA_E D_p \frac{dp}{dx'} = \frac{qA_E D_p p'(0)}{W_B} \quad \begin{array}{l} A_E \text{ é a área do emissor e } W_B \\ \text{é a largura da base} \end{array}$$

Disto resulta, então, que:

$$I_{Ep} = -qA_E D_p \frac{dp}{dx} = \frac{qA_E D_p p'(0)}{W_B} = \frac{qA_E D_p p_{0B}}{W_B} \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT} - 1\right)$$

p_{0B} é a densidade de lacunas na base em equilíbrio térmico.

Lembrando, além disto, que a amplitude da corrente de coletor é muito próxima da amplitude da corrente de emissor (a diferença é cerca de 1%), então podemos considerar que:

$$I_{Cp} \cong I_{Ep}$$

Temos, portanto, que:

$$I_C \cong I_{Cp} \cong \frac{qA_E D_p p_{0B}}{W_B} \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT} - 1\right)$$

A corrente de base, I_{B1} , calculada no lado do emissor da junção Base-Emissor, é uma corrente de difusão em uma região (emissor) cuja largura assume-se que seja muito maior do que o comprimento de difusão dos elétrons. Esta corrente é dada por:

$$I_B = I_{B1} = qA_E D_{nE} \frac{dn}{dx'} \quad \rightarrow \quad I_B = \frac{qA_E D_{nE} n_E(0)}{L_{nE}} = \frac{qA_E D_{nE} n_{0E}}{L_{nE}} \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right)$$

Onde $n_E(0)$ é a densidade de elétrons no lado do emissor, n_{0E} é a densidade de elétrons no equilíbrio térmico e L_{nE} é o comprimento de difusão dos elétrons.

Destas duas últimas equações podemos concluir que se I_B é mantida constante, a tensão V_{EB} é constante. E, se V_{EB} é constante, a corrente I_C também não varia. Deste modo, a razão entre a corrente de coletor e a corrente de base é dada por:

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{D_p p_{0B} L_{nE}}{D_{nE} n_{0E} W_B}$$

Esta relação mostra que I_C está diretamente relacionada com I_B , independente de V_{EB} , de forma que existe uma relação linear entre elas. Sendo assim, pode-se dizer que, nas condições em que esta relação foi deduzida, o transistor implementa um **amplificador linear de corrente**.

Os parâmetros do transistor bipolar

As correntes nos terminais de um transistor PNP, que esteja operando com a junção BE diretamente polarizada e a junção BC inversamente polarizada, são dadas por:

$$I_E = I_{En} + I_{Ep}$$

$$I_C = I_{Cn} + I_{Cp} = I_{Cp} + I_{CB0}$$

$$I_B = I_{En} + I_{rec} - I_{CB0}$$

A componente de corrente identificada como I_{CB0} corresponde à corrente na junção Base-Coletor com o outro terminal (no caso, o emissor) aberto. Esta corrente inclui os elétrons e lacunas que são gerados na região de depleção e que são varridos para a base (os elétrons) e coletor (as lacunas) devido ao intenso campo elétrico.

As componentes I_{En} e I_{rec} saem do terminal da base, enquanto I_{CB0} entra no terminal da base e sai do terminal do coletor.

Para um transistor bipolar, define-se a **eficiência de injeção de emissor**, γ , como sendo a razão entre a corrente das lacunas injetadas na base a partir do emissor e a corrente total de emissor.

$$\gamma = \frac{I_{Ep}}{I_E}$$

E, define-se como **Fator de Transporte da Base**, δ , a razão entre a corrente de lacunas no coletor e a corrente de lacunas que entra na base a partir do emissor

$$\delta = \frac{I_{Cp}}{I_{Ep}}$$

O produto $\gamma\delta$ é igual à razão (I_{cp}/I_E) e é conhecido como o *ganho de corrente DC de base comum* com a seguinte denominação:

$$\alpha = \gamma\delta = \frac{I_{Cp}}{I_E}$$

Para os transistores bipolares contemporâneos, o valor de α é muito próximo de um, variando entre 0,99 e 1.

Este parâmetro pode ser incorporado às equações das correntes do transistor, da seguinte maneira:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0}$$

Para introduzir a corrente de base I_B na equação acima, basta substituir I_E por $I_B + I_C$.

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{I_{CB0}}{1-\alpha}$$

Outros parâmetros que fazem parte da nomenclatura técnica dos transistores bipolares são β e I_{CEO} . Suas definições são as seguintes:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

I_{CEO} se refere à corrente que flui entre os terminais Coletor e Emissor com o terminal de base aberto. Sendo assim, podemos escrever a corrente de coletor como sendo:

$$I_C = \beta I_B + I_{CEO}$$

$$I_{CEO} = \frac{I_{CBO}}{1 - \alpha}$$

Em um transistor PNP, a corrente I_{CEO} é maior do que I_{CBO} porque os elétrons que são gerados na região de depleção da junção Base-Coletor são “varridos” para a base e de lá difundem para o emissor, causando um aumento na difusão de lacunas do emissor em direção à base, a maioria das quais atinge finalmente o coletor. Esta corrente de lacunas pode ser vista como sendo uma versão ampliada da corrente de elétrons.

EXEMPLO

Dado um transistor PNP no qual se verificam as seguintes componentes de corrente: $I_{Ep}=2\text{mA}$, $I_{En}=0,01\text{mA}$, $I_{Cp}=1,98\text{mA}$ e $I_{Cn}=0,001\text{mA}$, determine:

- a) O fator de transporte de base
- b) A eficiência de injeção
- c) α e β
- d) I_B , I_{CBO} e I_{CEO}

a) O fator de transporte de base é:

$$\delta = \frac{I_{Cp}}{I_{Ep}} = \frac{1,98}{2} = 0,99$$

b) A eficiência de injeção é dada por:

$$\gamma = \frac{I_{Ep}}{I_E} = \frac{I_{Ep}}{I_{Ep} + I_{En}} = \frac{2}{2 + 0,01} = 0,995$$

c) $\alpha = \delta\gamma = 0,985$ $\beta = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} = 65,67$

d) $I_B = I_E - I_C$ $I_E = I_{En} + I_{Ep} = 2,01\text{mA}$ $I_C = I_{Cp} + I_{Cn} = 1,981\text{mA}$

$$\therefore I_B = 0,029\text{mA} \quad I_{CBO} = I_C - \alpha I_E = 1,15\mu\text{A} \quad I_{CEO} = \frac{I_{CBO}}{1-\alpha} = 76,67\mu\text{A}$$