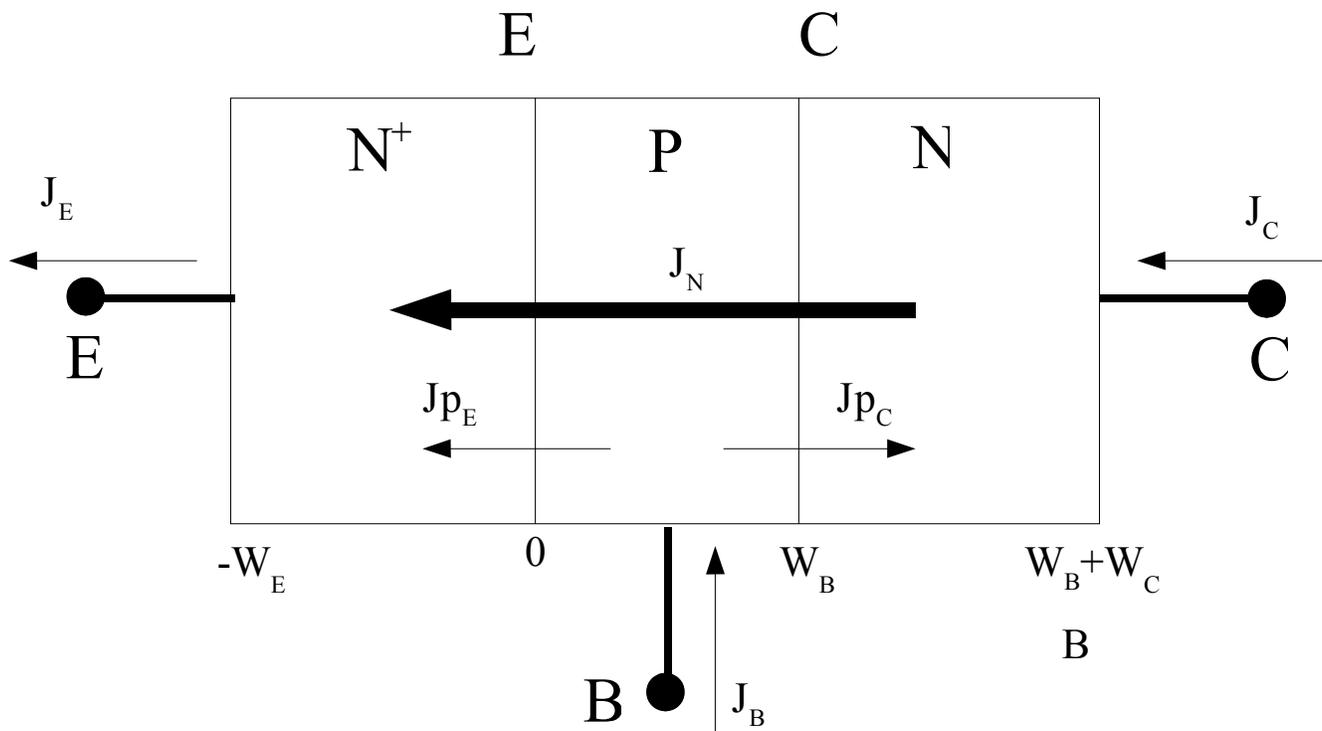


O TRANSISTOR UNIDIMENSIONAL

Para simplificação do modelamento, usamos de um transistor bipolar ideal UNIDIMENSIONAL, onde imaginamos todos o fluxos de corrente passando em uma superfície chamada “laminar” .



Para o transistor da figura acima, podemos escrever que:

$$J_E = J_n + J_{pE} \quad (37)$$

$$J_C = J_n - J_{pC} \quad (38)$$

As densidades de corrente J_n , J_{pE} e J_{pC} são calculadas a partir das expressões deduzidas anteriormente, utilizando os procedimentos empregados na sua dedução.

Integrando a “famosa” equação (9) entre 0 e W_B , como feito anteriormente, temos que:

$$J_n = \frac{q}{\int_0^{W_B} \frac{p}{D_n n_{iB^2}} dx} \cdot \left[\frac{pn}{(n_i)^2} \right]_0 - \left[\frac{pn}{(n_i)^2} \right]_{WB}$$

Analogamente, podemos calcular as correntes de lacunas dentro do emissor e dentro do coletor:

$$J_{pE} = \frac{\left[\frac{pn}{(n_i)^2} \right]_0 - 1}{\int_{-WE}^0 \frac{n}{q D_p n_{i^2}} dx \cdot \left[1 - \frac{\int_0^{-WE} \frac{p}{q D_n n_{i^2}} dx}{\int_{WB}^{-WE} \frac{p}{q D_n n_{i^2}} \frac{dx}{b}} \right]} \quad (40)$$

$$J_{pC} = \frac{\left[\frac{pn}{(n_i)^2} \right]_{WB} - 1}{\int_{WB}^{WB+WC} \frac{n}{q D_p n_{i^2}} dx \cdot \left[1 - \frac{\int_{WB}^{WB+WC} \frac{p}{q D_n n_{i^2}} dx}{\int_0^{WB+WC} \frac{p}{q D_n n_{i^2}} \frac{dx}{b}} \right]} \quad (41)$$

Iniciando o estudo sob condições de baixa injeção (ou seja, em baixos níveis de corrente), é fácil ver que:

$$\int_{-W_E}^0 \frac{p}{D_n n_i^2} dx \ll \int_{-W_E}^{W_B} \frac{p}{D_n n_i^2} dx \quad (42)$$

$$\int_{W_B}^{W_B+W_C} \frac{p}{D_n n_i^2} dx \ll \int_0^{W_B+W_C} \frac{p}{D_n n_i^2} dx \quad (43)$$

Usando as condições (42) e (43) e aplicando a aproximação de Boltzman para calcular o produto pn em cada uma das junções, em função da tensão externa aplicada V_A , as expressões para J_n , J_{pE} e J_{pC} são muito simplificadas e podem ser escritas como:

$$J_E = \frac{q}{W_B} \int_0^{W_B} \frac{p}{D_n n_i^2} dx \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{V_{BC}}{V_T}\right) \right] + \frac{q}{\int_{-W_E}^0 \frac{n}{D_n n_i^2} dx} \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (44)$$

$$J_C = \frac{q}{W_B} \int_0^{W_B} \frac{p}{D_n n_i^2} dx \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{V_{BC}}{V_T}\right) \right] + \frac{q}{\int_{W_B}^{W_B+W_C} \frac{p}{D_p n_i^2} dx} \left[\exp\left(\frac{V_{BC}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (45)$$

Se usarmos as definições:

$$J_{S1} = \frac{q}{W_B} + \frac{q}{\int_0^0 \frac{p}{D_n n_{i^2}} dx + \int_{-W_E}^0 \frac{n}{D_n n_{i^2}} dx} \quad (43)$$

$$J_{S2} = \frac{q}{W_B} + \frac{q}{W_B + W_C} + \frac{q}{\int_0^0 \frac{p}{D_n n_{i^2}} dx + \int_{W_B}^{W_B+W_C} \frac{n}{D_p n_{i^2}} dx} \quad (44)$$

$$\alpha_N \cdot J_{S1} = \alpha_I \cdot J_{S2} = \frac{q}{W_B} + \frac{q}{\int_0^0 \frac{p}{D_n n_{i^2}} dx} \quad (45)$$

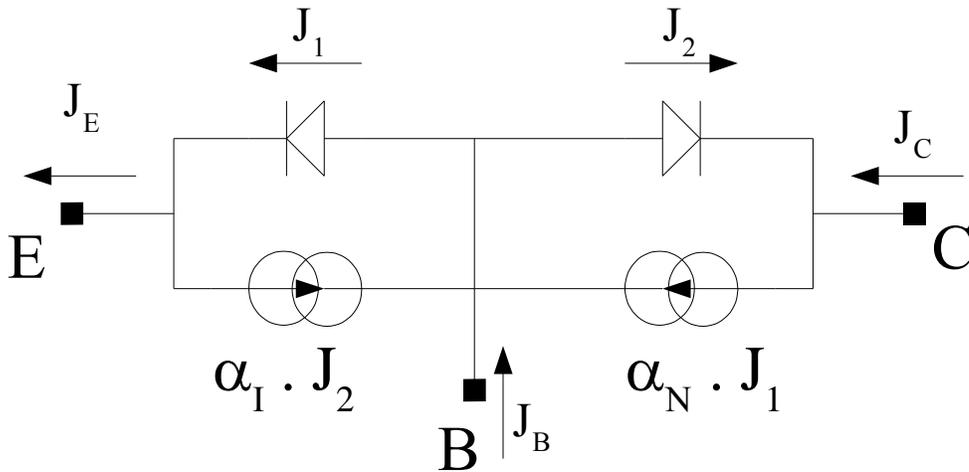
Chegamos às clássicas e muito conhecidas expressões de Ebers-Moll:

$$J_E = J_{S1} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right] - \alpha_I J_{S2} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{BC}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (46)$$

$$J_C = \alpha_N J_{S1} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right] - J_{S2} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{BC}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (47)$$

$$J_B = J_E - J_C \quad (48)$$

Podemos usar um modelo elétrico simples para representar as equações (46), (47) e (48) por meio de dois diodos e duas fontes de corrente.



Com

$$J_1 = J_{S1} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (49)$$

$$J_2 = J_{S2} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{BC}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (50)$$

É interessante notar que podemos calcular todas as correntes em um transistor, usando este modelo, para o qual precisamos apenas de quatro parâmetros: J_{S1} , J_{S2} , α_N , α_I .

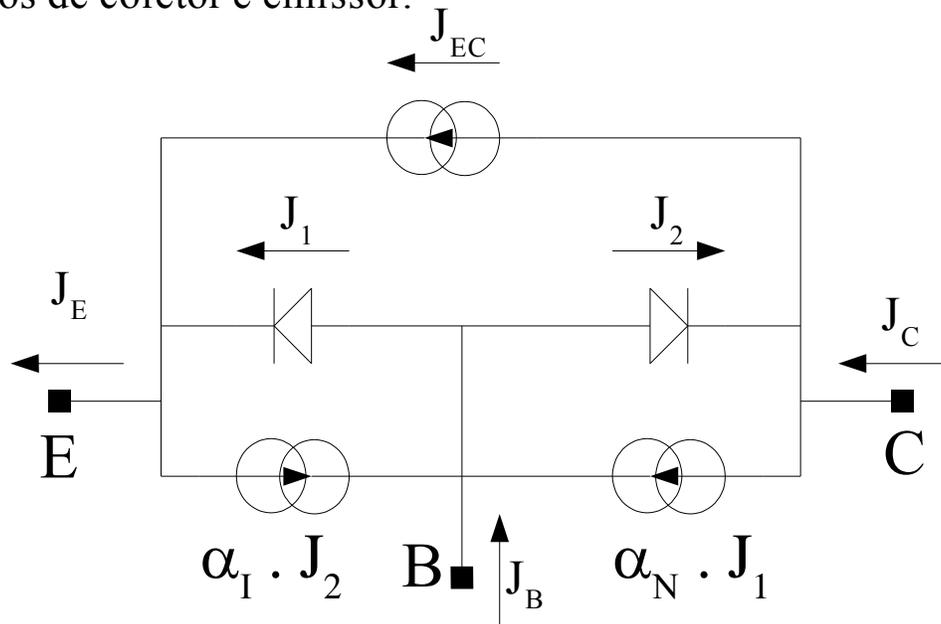
$$\int_0^{W_B} \frac{p}{D_n n_i^2} dx \simeq \int_{W1}^{W1} \frac{N_A}{D_n n_i^2} dx \quad (51)$$

Dessa forma, vemos que a **concentração de dopantes na base** desempenha papel fundamental na definição das características do transistor. Este valor é independente das tensões aplicadas externamente, e é conhecido como número de Gummel.

Embora o número de Gummel seja um parâmetro tecnológico, dependente apenas da distribuição das impurezas na base do transistor, **as tensões externas aplicadas V_{BE} e V_{BC} fazem com que as fronteiras W_1 e W_2 mudem, fazendo com que o “tamanho” da base também mude.**

Isso afeta o valor da integral na equação (51), e é chamado de **EFEITO EARLY**.

A variação das correntes associada ao Efeito Early podem ser representadas no modelo de Ebers-Moll através da adição de uma fonte de corrente extra, colocada entre os contatos de coletor e emissor.



Onde a corrente devido ao efeito Early é dada por:

$$J_{EC} = J_S' \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{V_{BC}}{V_T}\right) \right] \quad (52)$$

Com

$$\text{em polarização direta} \rightarrow J_S' = \alpha_N J_{S10} \mu_{C0} \cdot \frac{|V_{BC}|}{V_T} \quad (53)$$

$$\text{em polarização reversa} \rightarrow J_S' = \alpha_I J_{S20} \mu_{E0} \cdot \frac{|V_{BE}|}{V_T} \quad (54)$$

μ_{C0} e μ_{E0} são chamados de fator de reação Early no coletor e no emissor, respectivamente.

É sabido que as medidas da eficiência de injeção nos transistores bipolares apresentam uma discrepância muito grande em relação aos valores teóricos, calculados através da equação (16) apresentada anteriormente. A única explicação para o fato é que as concentrações intrínsecas n_i são diferentes no emissor e na base, o que só pode ser explicado através da degenerescência dentro do emissor.

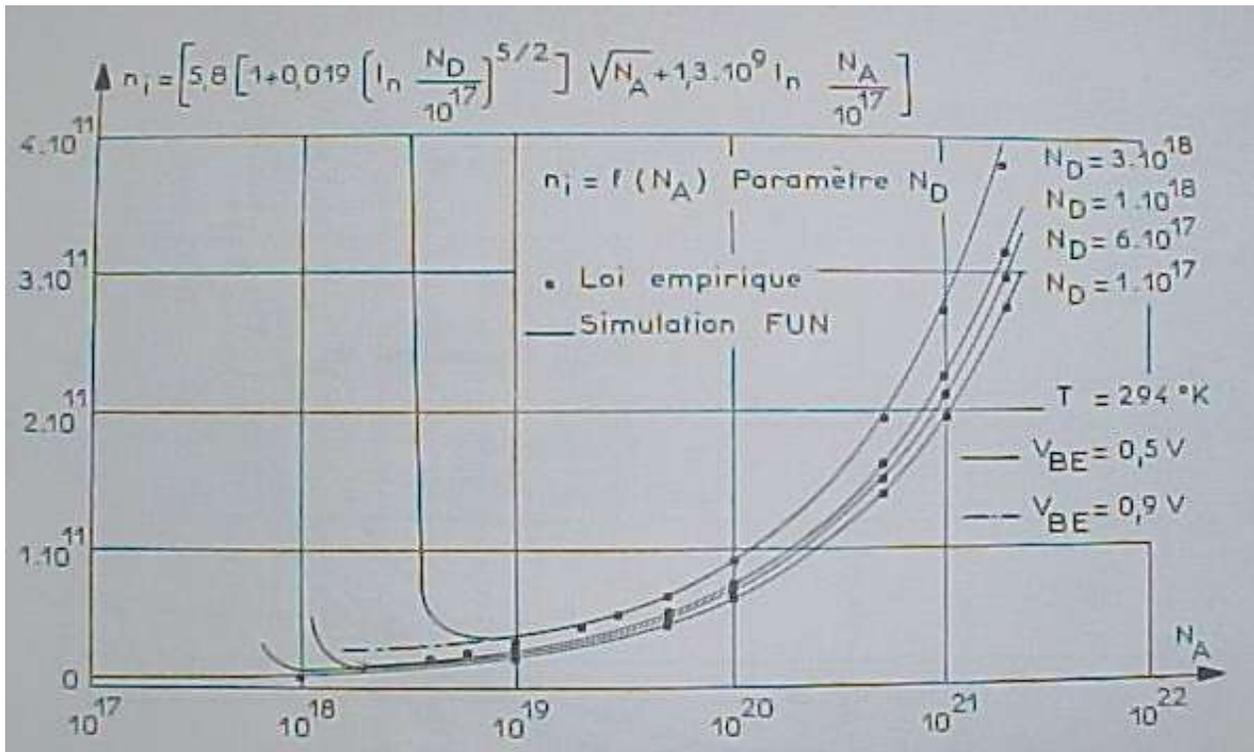
Apresentamos, a seguir, os resultados desenvolvidos por Jean-Pierre Bailbé para fazer uma aproximação das concentrações n_i em função das dopagens.

$$n_i(N_D) = 4,3 \cdot \left[1 + 0,032 \ln \left(\frac{N_A}{10^{17}} \right)^{\frac{5}{2}} \right] \sqrt{N_D} + 1,3 \cdot 10^9 \ln \left(\frac{N_D}{10^{17}} \right) \quad (55)$$

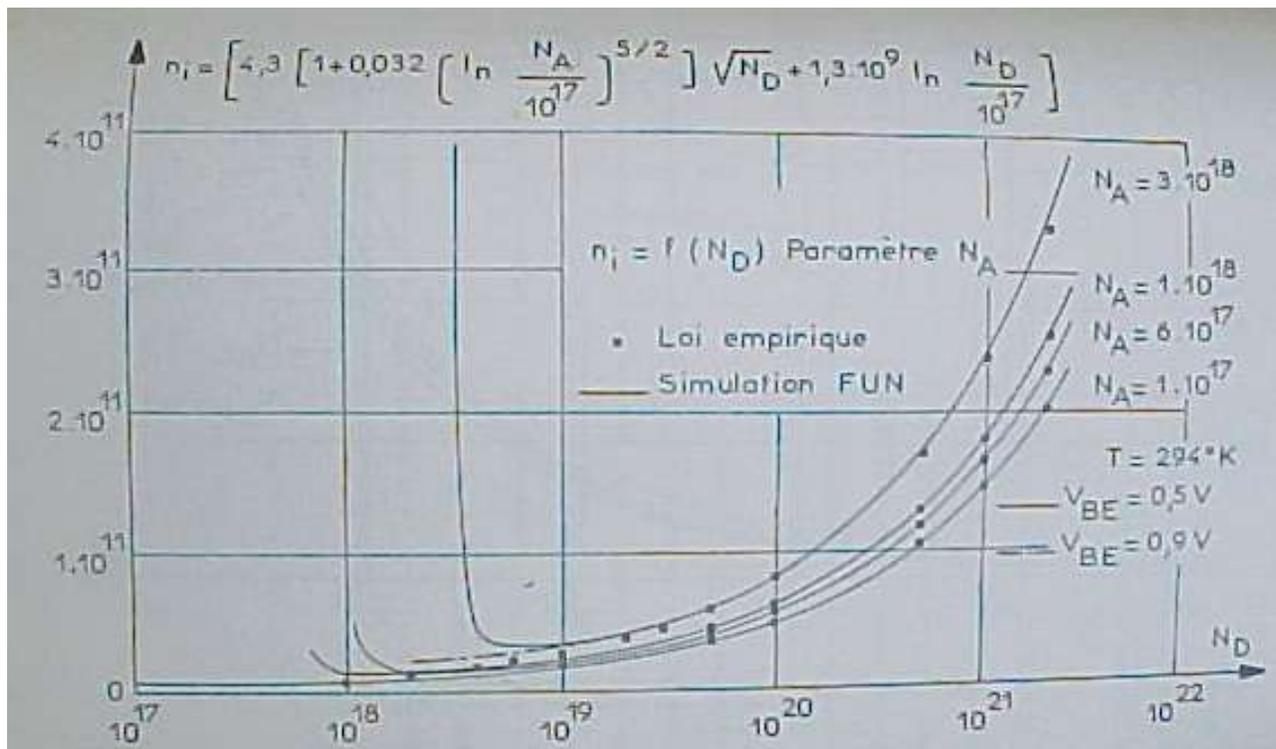
$$n_i(N_A) = 5,8 \cdot \left[1 + 0,019 \ln \left(\frac{N_D}{10^{17}} \right)^{\frac{5}{2}} \right] \sqrt{N_A} + 1,3 \cdot 10^9 \ln \left(\frac{N_A}{10^{17}} \right) \quad (56)$$

A seguir apresentamos a comparação entre estas expressões empíricas acima e os cálculos numéricos precisos, feitos através do programa *FUN*, para vários valores de dopagem.

É importante observar que em um transistor bipolar, para aumentar a eficiência de injeção, **aumentamos muito a dopagem do emissor** e diminuimos dopagem da base, e como **n_i aumenta fortemente com o aumento da dopagem, o emissor é muito sensível ao fenômeno da degenerescência.**



Variação de n_i em função de N_A , com N_D como parâmetro



Variação de n_i em função de N_D , com N_A como parâmetro

Podemos concluir que:

a) a eficiência de injeção intrínseca (γ_0) é muito sensível ao valor da dopagem no emissor ($n_{iE}^2 \gg n_{iB}^2$):

$$\gamma_0 = \frac{D_{NB} n_{iB}^2}{D_{NE} n_{iE}^2} \cdot \frac{Q_E}{Q_B} \quad (57)$$

b) a característica tensão-corrente J_C em função de V_{BE} não é afetada (ou é muito difícil de ser afetada) pelo efeito da degenerescência, já que a dopagem da base é muito pequena, e portanto n_{iB}^2 é praticamente igual para todos os transistores bem projetados.

$$J_C = \frac{q}{\int_0^{W_B} \frac{N_A}{D_n n_{iB}^2} dx} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (58)$$

b) a corrente de base intrínseca do transistor (J_B^* , que é a corrente de lacunas J_P) é fortemente alterada pelo efeito da degenerescência, já que podemos escrever $J_B^* = J_P$ como:

$$J_P = \frac{q}{\int_{-W_E}^0 \frac{N_D}{D_n n_{iE}^2} dx} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (59)$$

Comparação dos valores da Eficiência de Injeção calculados:

- a) sem considerar a degenerescência;
- b) usando a aproximação analítica proposta por Bailbé
- c) calculados numericamente (através do programa FUN).

γ_0 <i>sem degenerescência</i>	3188	816	820	6912	554
γ_0 <i>com degenerescência</i>	71	9	28	8,4	10,2
γ_0 <i>simulador FUN</i>	70	9,5	26	8	10
W_E (μm)	0,47	1,95	3,75	1,6	1,5
N_D (atm.cm^{-3})	$0,25 \cdot 10^{21}$	$0,25 \cdot 10^{21}$	$0,06 \cdot 10^{21}$	$1,5 \cdot 10^{21}$	$0,11 \cdot 10^{21}$

Como podemos observar, a influência da degenerescência no emissor é muito importante, fazendo com que a eficiência de injeção seja muito reduzida.

Este fenômeno é particularmente importante para emissores muito dopados.