

Sumário

Introdução	5
Dissipação de potência no transistor	6
Potência fornecida ao transistor	6
Dissipação máxima no transistor	8
Fatores que influenciam na dissipação máxima	10
Variação da potência de dissipação máxima com a temperatura	12
Correntes de fuga no transistor	15
Movimento dos portadores minoritários	16
Corrente de coletor com emissor em aberto	16
Corrente de coletor com base em aberto	17
Correção da relação entre as correntes de coletor e de base no transistor	18
Influência da temperatura na corrente de coletor	19
Disparo térmico	20
Apêndice	21
Questionário	21
Bibliografia	22



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

A descoberta do transistor determinou o final da era das válvulas eletrônicas, uma vez que a partir do emprego daquele componente foi possível desenvolver circuitos eletrônicos operando a baixas voltagens compondo montagens substancialmente mais compactas, eliminando as limitações inerentes às válvulas que, por envelhecimento, eram freqüentemente substituídas nos equipamentos eletrônicos.

Apesar dessas vantagens, o transistor também tem as suas limitações. Um dos fatores mais importantes com respeito a essas limitações se refere àquela imposta pelo aquecimento do componente.

Este fascículo trata dos fatores associados ao aquecimento do transistor e das correntes de fuga presentes no componente, com o objetivo de capacitar o leitor a conhecer os limites de operação que deverão ser observados quando da utilização de transistores em circuitos eletrônicos.



Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Dissipação de potência.
- Diodo semiconductor.
- Transistor bipolar: princípio de operação.

Dissipação de potência no transistor

Todo componente sujeito a uma diferença de potencial V e percorrido por uma corrente I consome uma potência

$$P = VI \quad (1)$$

Pode-se citar, por exemplo, o caso de uma lâmpada que ao estar submetida a uma diferença de potencial entre seus terminais é percorrida por uma corrente, dissipando energia em forma de luz e calor.

O transistor consome potência devido à circulação de corrente elétrica através das junções, provocada pela aplicação de tensões entre os seus terminais. Essa potência dissipada na forma de calor, resulta em um aquecimento do componente.

POTÊNCIA FORNECIDA AO TRANSISTOR

O transistor é um componente de três terminais, conforme ilustrado na **Fig.1**. Admitindo os sentidos de corrente e os potenciais nos terminais aí indicados, a potência fornecida ao transistor pelas fontes externas pode ser calculada da relação

$$P_{\text{total}} = V_C I_C + V_B I_B + V_E I_E \quad (2)$$

com os parâmetros I_C , I_B e I_E , representando as correntes fluindo do circuito para os terminais do transistor e V_C , V_B e V_E , correspondendo aos

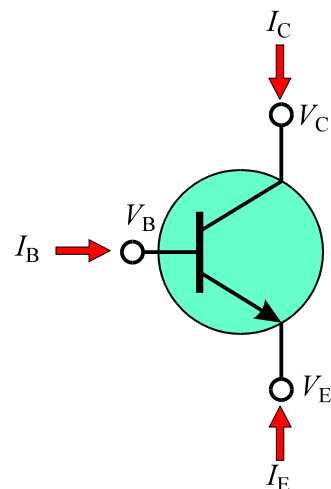


Fig.1 Grandezas elétricas associadas aos terminais de um transistor.

potenciais nos terminais C , B e E , respectivamente.

Sem alteração da **Eq.(2)** pode-se escrever

$$P_{\text{total}} = V_C I_C + (V_E I_C - V_E I_C) + V_B I_B + (V_E I_B - V_E I_B) + V_E I_E$$

ou seja, os termos entre parêntesis são todos nulos e não alteram a **Eq.(2)**.

Reagrupando os termos da expressão anterior, tem-se que

$$P_{\text{total}} = (V_C - V_E) I_C + (V_B - V_E) I_B + V_E (I_C + I_B + I_E) \quad (3)$$

Com base na **Fig.1** as quedas de tensão entre os terminais C e E e entre os terminais B e E podem ser obtidas das relações

$$V_{CE} = V_C - V_E \quad (4)$$

$$V_{BE} = V_B - V_E \quad (5)$$

Substituindo as **Eqs.(4)** e **(5)** na **Eq.(3)** vem

$$P_{\text{total}} = V_{CE} I_C + V_{BE} I_B + V_E (I_C + I_B + I_E) \quad (6)$$

Pela 1ª. lei de Kirchhoff, a soma das correntes que fluem do circuito para os terminais do transistor da **Fig.1** é nula, i.e.,

$$I_C + I_B + I_E = 0 \quad (7)$$

e conseqüentemente, o último termo entre parêntesis da **Eq.(6)** é nulo, resultando em

$$P_{\text{total}} = V_{CE} I_C + V_{BE} I_B \quad (8)$$

A **Eq.(8)** mostra que a potência fornecida ao transistor é a soma de dois termos:

- A **potência de coletor**, definida pela relação

$$P_C = V_{CE} I_C \quad (9)$$

- A **potência de base**, definida pela relação

$$P_B = V_{BE} I_B \quad (10)$$

DISSIPACÃO MÁXIMA NO TRANSISTOR

Nas **Eqs.(8)** a **(10)** deve-se utilizar a convenção de sinais e as definições para as correntes e tensões nos terminais do transistor. Dessa forma, para um transistor *npn* operando na região ativa os parâmetros I_C , I_B , V_{CE} e V_{BE} são todos positivos, sendo todos negativos para o caso de um transistor *pnp*. Assim, as potências obtidas das **Eqs.(8)** a **(10)** são sempre números positivos.

Como discutido em fascículos anteriores, considerando o transistor operando na região ativa, conforme ilustrado na **Fig.2**, tem-se que $I_B \ll I_C$. Além disso, como na região ativa a junção base-emissor é polarizada diretamente

$$V_{BE} \approx 0,2 \text{ a } 0,3 \text{ V (germânio)}$$

$$V_{BE} \approx 0,6 \text{ a } 0,7 \text{ V (silício)}$$

e esses valores típicos são sempre bem inferiores à tensão coletor-emissor em condições normais de operação do transistor.

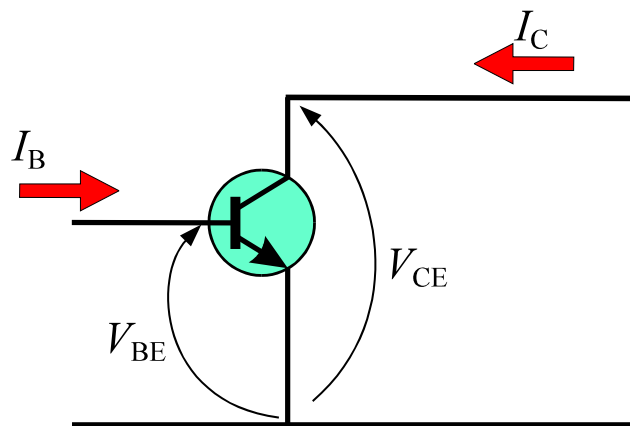


Fig.2 Transistor *npn* operando na região ativa.

Com essas considerações, conclui-se a partir das **Eqs.(9)** e **(10)** que as potências P_C e P_B satisfazem à condição

$$P_C = V_{CE} I_C \gg V_{BE} I_B = P_B$$

ou seja, a potência de coletor é muito superior à potência de base do transistor. Isso permite desprezar o segundo termo do segundo membro da **Eq.(8)**, i.e.,

$$P_C \gg P_B \Rightarrow P_{\text{total}} = P_C + P_B \approx P_C$$

ou equivalentemente, utilizando a **Eq.(9)**,

$$P_{\text{total}} \approx V_{CE} I_C \quad (11)$$


A potência fornecida ao transistor é dissipada em forma de calor produzindo uma elevação de temperatura da estrutura semicondutora do componente.

Os valores máximos de temperatura de operação dos cristais de germânio e silício estão mostrados na **Tabela 1**. Acima dos limites de temperatura aí estabelecidos, as propriedades materiais dos cristais de Si e Ge sofrem alterações significativas desviando-os de suas características normais de operação.

Tabela 1 Temperaturas máximas de operação para os cristais de Si e Ge

Cristal	Temperatura máxima
silício	120 °C
germânio	90°C

Para evitar que as características elétricas do transistor sejam influenciadas pelo aquecimento excessivo do cristal semicondutor, a potência dissipada no transistor é limitada a um valor que permite o funcionamento normal do componente. Esse valor de potência é denominado de **potência de dissipação máxima** e representado pelo parâmetro $P_{C,\text{máx.}}$, sendo fornecido pelo fabricante nos folhetos de especificações do componente.

 **Potência de dissipação máxima é o valor máximo de potência que pode ser fornecida ao transistor sem que este sofra desvios significativos de suas características elétricas ou danos por sobreaquecimento.**

FATORES QUE INFLUENCIAM NA DISSIPAÇÃO MÁXIMA

A potência de dissipação máxima de um transistor é influenciada pela resistência térmica do encapsulamento e pela temperatura externa, conforme discutido a seguir.

Resistência térmica do encapsulamento

A resistência térmica é um parâmetro que determina a oposição apresentada por um material ao fluxo de calor. Dessa forma bons condutores térmicos são aqueles materiais que exibem uma baixa resistência térmica e nos quais o calor pode ser transmitido mais rapidamente.

No caso do transistor, a resistência térmica do encapsulamento determina a rapidez com que o calor gerado internamente é escoado para o meio ambiente, conforme ilustrado na **Fig.3**

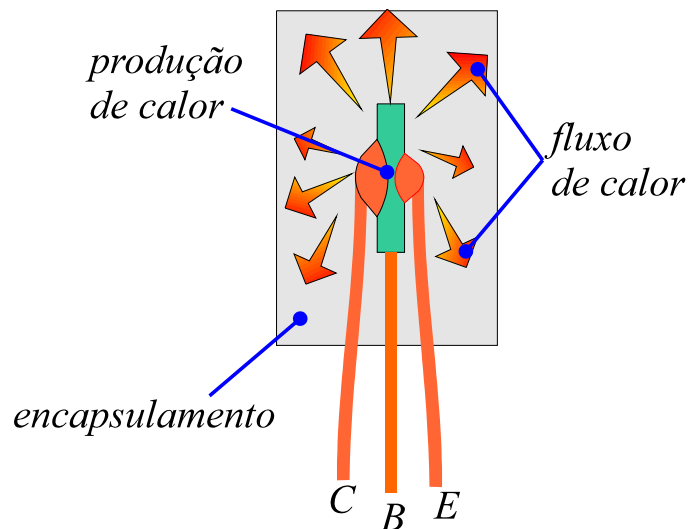


Fig.3 Fluxo de calor através do encapsulamento de um transistor.

Os transistores fabricados com capacidade de dissipação elevada, denominados de transistores de potência, são normalmente encapsulados em invólucros metálicos, como ilustrado na **Fig.4**. Esse tipo de componente é afixado em uma superfície metálica que aumenta a eficiência da dissipação de calor para o meio ambiente.

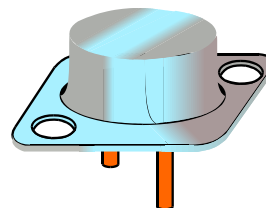


Fig.4 Encapsulamento de um transistor de potência.

Os transistores de baixa dissipação, geralmente denominados de transistores de sinal, são encapsulados em invólucros plásticos, na forma ilustrada na Fig.5.

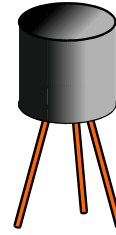


Fig.5 Transistor com encapsulamento de plástico.

Temperatura externa

O fluxo de calor através de um material também depende da diferença de temperatura entre as paredes do material, conforme ilustrado na Fig.6.

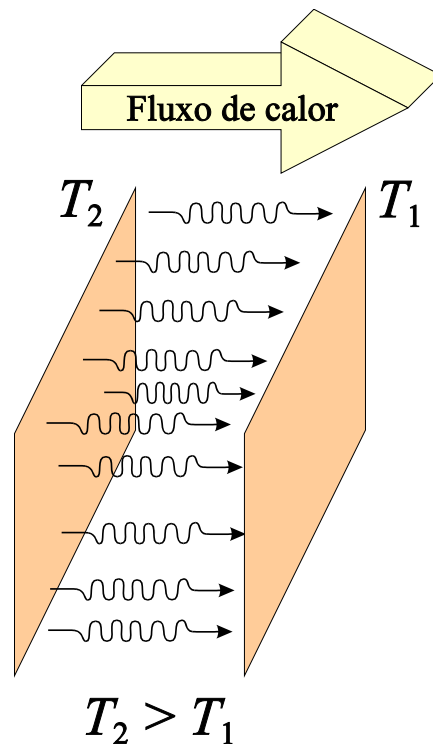



Fig.6 Fluxo de calor entre as paredes de um material.

Para que haja transmissão de calor, as duas superfícies devem exibir temperaturas distintas e nessas condições o calor flui da parede de temperatura mais alta para aquela de temperatura mais baixa.


Quanto maior for a diferença de temperatura entre paredes, tanto maior será o fluxo de calor. Isso explica por exemplo, por que uma xícara de café esfria mais rapidamente no inverno do que no verão.

Esse conceito aplicado ao transistor pode ser posto de acordo com a seguinte afirmativa:

 ***O fluxo de calor entre o transistor e o meio ambiente depende da diferença entre a temperatura interna do transistor e a temperatura do ambiente externo.***

Dessa forma, quanto mais baixa for a temperatura do ambiente externo, tanto mais rapidamente se dará o escoamento do calor gerado no componente, diminuindo assim o seu aquecimento.

Assim, dois transistores trabalhando com tensões e correntes idênticas poderão aquecer diferentemente se estiverem operando em ambientes de temperaturas distintas.

 ***Devido à influência da temperatura na transmissão de calor, a especificação de potência máxima de dissipação é feita para uma dada temperatura.***

Por exemplo, o folheto de especificações técnicas do transistor BC547 fornece um valor para a potência máxima de dissipação de 500 mW a uma temperatura de no máximo 25 °C. Esse valor de temperatura é geralmente adotado como padrão nos folhetos de especificações de transistores e outros componentes.

VARIAÇÃO DA POTÊNCIA DE DISSIPACÃO MÁXIMA COM A TEMPERATURA

Em muitas ocasiões faz-se necessário utilizar transistores em circuitos que irão funcionar a temperaturas superiores ao valor padrão de 25°C. Nessas situações é necessário considerar que o valor de potência de dissipação máxima especificado a 25 °C não pode ser empregado.

Para que o transistor possa ser utilizado a uma temperatura ambiente superior ao valor padrão de 25 °C, os fabricantes fornecem, no folheto de especificações do componente, um gráfico da potência de dissipação máxima como função da temperatura ambiente. O gráfico mostrado na **Fig.7**, por exemplo, é representativo das condições de operação dos transistores BC546, 547 e 548. O emprego do gráfico na determinação da potência de dissipação máxima é ilustrado no exemplo a seguir.

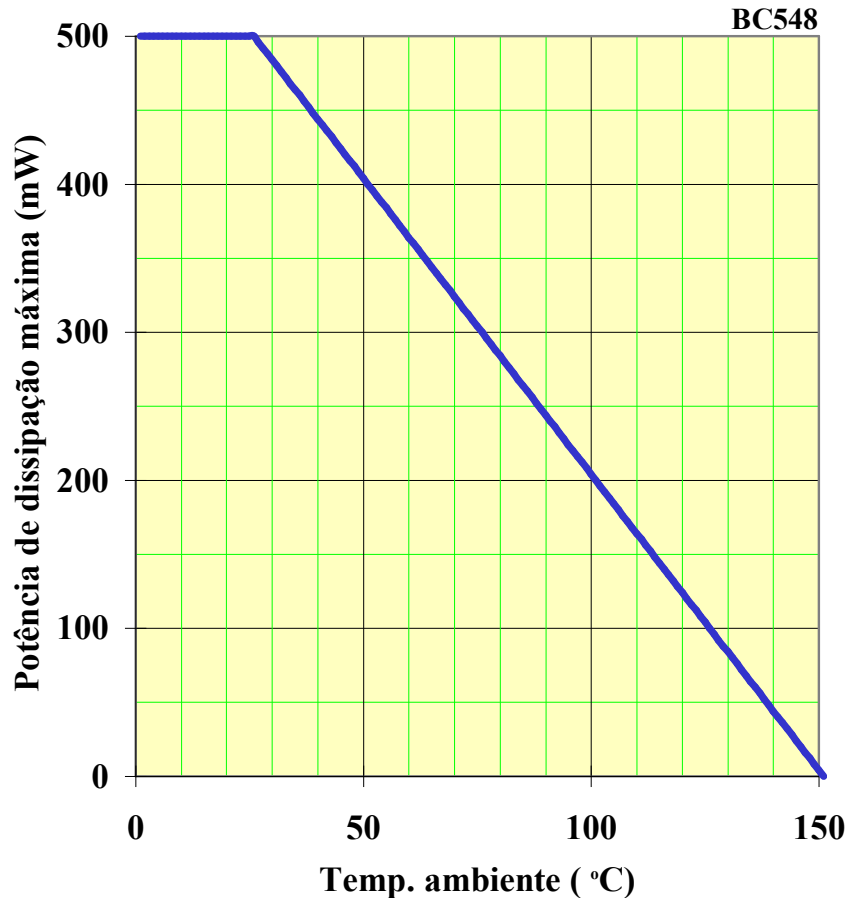


Fig.7 Potência de dissipação máxima como função da temperatura ambiente para o transistor BC548.

Exemplo 1: Determinar a potência de dissipação máxima para o transistor BC548 para operação a uma temperatura ambiente de 50 °C.

No gráfico da **Fig.8**, seleciona-se no eixo horizontal o valor de 50°C para a temperatura ambiente. A interseção com a curva, da linha vertical traçada a partir desse valor de temperatura, define o valor de 400 mW para a potência de dissipação máxima.

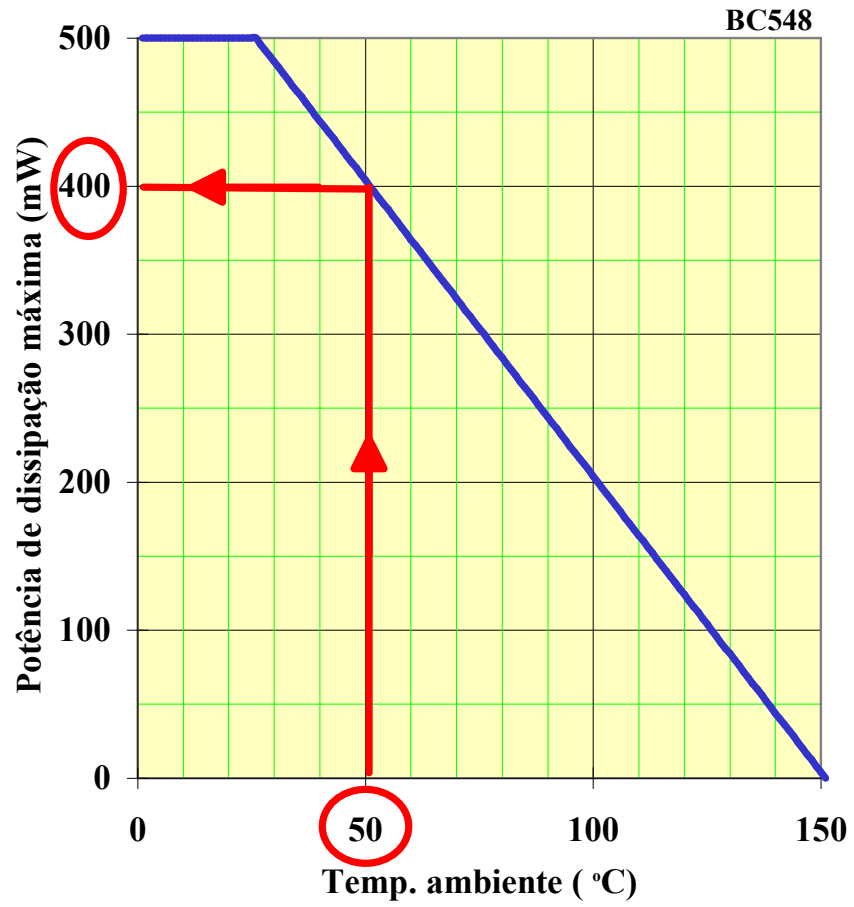


Fig.8 Determinação gráfica da potência de dissipação máxima para o Exemplo 1.

Correntes de fuga no transistor

Os transistores são fabricados com materiais semicondutores do tipo p e do tipo n . Esses materiais sofrem um processo de purificação e dopagem que permite obter a predominância de um tipo de portador.

Assim, qualquer cristal semicondutor do tipo p apresenta uma grande quantidade de lacunas e apenas uma pequena quantidade de elétrons livres. Nesses materiais, as lacunas são denominadas de **portadores majoritários** e os elétrons de **portadores minoritários**, conforme ilustrado na **Fig.9a**.

Semelhantemente, em um semicondutor tipo n , existe uma grande predominância de elétrons livres em comparação com as lacunas, conforme mostrado na **Fig.9b**. Nesses materiais, os elétrons livres são os portadores majoritários e as lacunas, os minoritários.

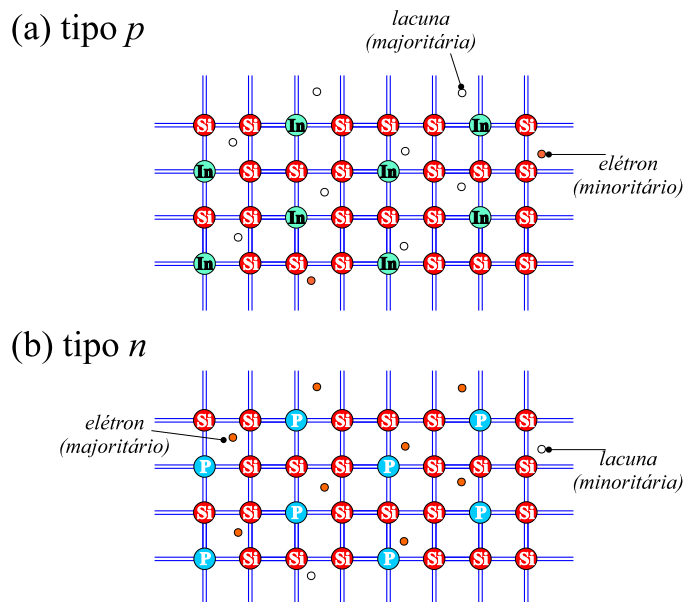


Fig.9 Portadores majoritários e minoritários em um semicondutor: (a) tipo p , (b) tipo n .

MOVIMENTO DOS PORTADORES MINORITÁRIOS

Os portadores minoritários sofrem a influência das tensões externas aplicadas ao componente semiconductor, movimentando-se no interior da estrutura cristalina.

O movimento de portadores minoritários através de uma junção pn só é importante quando esta fica submetida a uma polarização inversa. Como pode ser observado na **Fig.10**, o potencial inversamente aplicado favorece a injeção dos portadores minoritários através da junção, dando origem a uma pequena corrente de fuga.

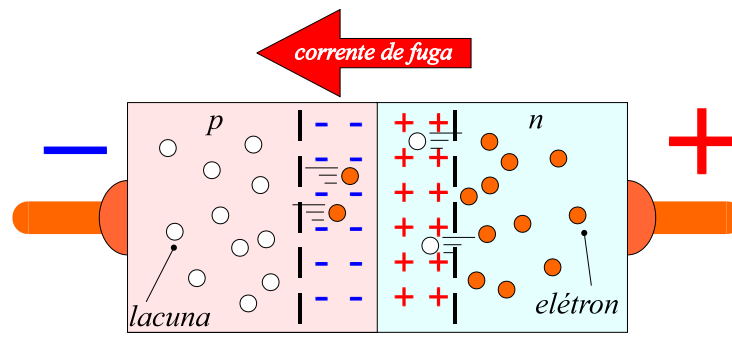


Fig.10 Movimento de portadores minoritários em uma junção pn inversamente polarizada.

Nos transistores o movimento dos portadores minoritários é importante apenas na junção base-coletor visto que essa junção permanece inversamente polarizada nas condições normais de operação do componente.

CORRENTE DE COLETOR COM EMISSOR EM ABERTO

A injeção dos portadores minoritários através da junção base-coletor, inversamente polarizada, dá origem a uma pequena corrente de fuga entre base e coletor.

Com o emissor em aberto, na configuração mostrada na **Fig.11**, essa corrente de fuga assume um valor próximo daquele obtido para um diodo inversamente polarizado. Para o

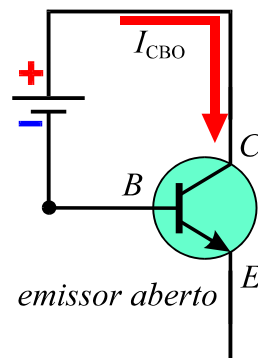


Fig.11 Transistor com emissor em aberto.

transistor, essa corrente é denominada de **corrente de coletor com emissor em aberto**, sendo representada pelo parâmetro I_{CBO} .

Com o emissor em aberto tem-se $I_E = 0$ e da **Eq.(7)** resulta

$$I_B = -I_C \quad (12)$$

e da definição do parâmetro I_{CBO} , obtém-se

$$I_E = 0 \Rightarrow \begin{cases} I_C = I_{CBO} \\ I_B = -I_{CBO} \end{cases} \quad (13)$$

CORRENTE DE COLETOR COM BASE EM ABERTO

Um segundo parâmetro de importância na avaliação dos efeitos das correntes de fuga em um transistor é a **corrente de coletor com base em aberto**, representada pelo parâmetro I_{CEO} .

Como mostrado na **Fig.12**, com a base em aberto tem-se $I_B = 0$ e da **Eq.(7)** resulta

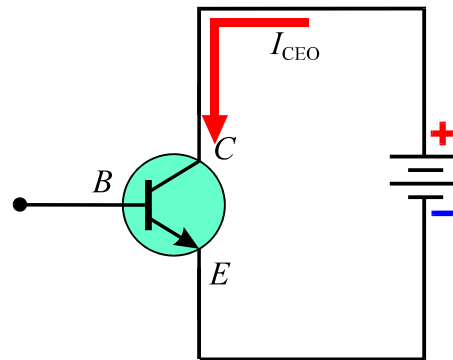


Fig.12 Transistor com base em aberto.

$$I_E = -I_C \quad (14)$$

e da definição do parâmetro I_{CEO} , obtém-se

$$I_B = 0 \Rightarrow \begin{cases} I_C = I_{CEO} \\ I_E = -I_{CEO} \end{cases} \quad (15)$$

CORREÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE AS CORRENTES NO TRANSISTOR

Como discutido em fascículos anteriores, o ganho de corrente do transistor em operação na região ativa permite obter a corrente de coletor diretamente da corrente de base, a partir da expressão

$$I_C = \beta I_B \quad (16)$$

No entanto a **Eq.(16)** prevê que a corrente de coletor se anula se a corrente de base também for nula. Conforme já discutido na seção anterior isso não ocorre pois com $I_B = 0$, flui uma pequena corrente I_{CEO} entre coletor e emissor.

Isso implica que a **Eq.(16)** foi obtida de forma aproximada sob a hipótese de o transistor operar na região ativa. No entanto, deve-se introduzir uma modificação na **Eq.(16)** de forma a se poder prever o comportamento do transistor quando a corrente de base tende a diminuir até um valor nulo. Essa modificação corresponde a uma simples adição do termo I_{CEO} ao segundo membro da **Eq.(16)** resultando em

$$I_C = \beta I_B + I_{CEO} \quad (17)$$

Assim, uma inspeção da **Eq.(17)** mostra que:

- $I_B = 0 \Rightarrow I_C = I_{CEO}$, conforme previsto pela **Eq.(15)**.
- Na região ativa, $\beta I_B \gg I_{CEO} \Rightarrow I_C \approx \beta I_B$, conforme previsto pela **Eq.(16)**.

Como mencionado anteriormente, a corrente I_{CBO} é da ordem da corrente de saturação inversa obtida para um diodo comum. Surge então uma importante questão:

Qual a ordem de grandeza da corrente de fuga no coletor de um transistor? Ou alternativamente: Qual a relação entre a corrente de coletor com base em aberto, I_{CEO} , e aquela obtida com emissor em aberto, I_{CBO} ?

A resposta a essa questão envolve uma análise mais detalhada que leva em conta todas as componentes de corrente do transistor e que permite demonstrar que a relação procurada é da forma

$$I_{CEO} = (\beta + 1)I_{CBO} \quad (18)$$

Como na região ativa, $\beta \approx 100$, a **Eq.(18)** mostra uma diferença importante entre o valor da corrente de fuga no coletor de um transistor relativamente àquela em um diodo comum.



A corrente de fuga no coletor de um transistor é aproximadamente $(\beta+1)$ vezes superior àquela observada em um diodo polarizado inversamente.

Na aproximação $\beta \gg 1$, a **Eq.(18)** pode ser aproximada para

$$I_{CEO} \approx \beta I_{CBO} \quad (19)$$

Inserindo a aproximação dada pela **Eq.(19)** na **Eq.(17)**, resulta

$$I_C = \beta(I_B + I_{CBO}) \quad (20)$$

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA CORRENTE DE COLETOR

O aquecimento de um cristal semiconductor promove o rompimento de ligações covalentes, gerando portadores minoritários no cristal. No caso do transistor, o acréscimo de portadores minoritários com a temperatura aumenta a corrente de fuga no coletor.

A **Fig.13** apresenta um gráfico típico da dependência com a temperatura da corrente I_{CBO} para transistores de germânio e silício, em escala logarítmica.

Como se pode observar na **Fig.13**, a corrente I_{CBO} dobra a cada 10 °C aproximadamente nos transistores de germânio e silício. Embora essa variação seja aproximadamente a mesma em

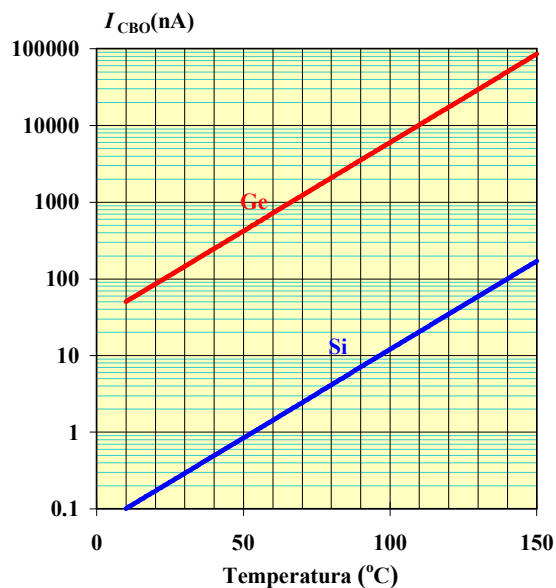


Fig.13 Dependência com a temperatura da corrente I_{CBO} para transistores de germânio e silício.

ambos os tipos de materiais, o parâmetro I_{CBO} é cerca de 500 vezes menor no transistor de silício relativamente ao de germânio. Daí a grande predominância de uso do silício na fabricação de transistores e outros dispositivos semicondutores.

DISPARO TÉRMICO

O **disparo térmico**, também denominado de **avalanche térmica**, é um fenômeno que ocorre no transistor devido à corrente de fuga e que pode levá-lo à destruição por superaquecimento. Como ilustrado na **Fig.14**, a seqüência de eventos que culminam com este fenômeno é a seguinte:

- A medida que o transistor funciona em um circuito eletrônico ocorre um aquecimento das junções como resultado da dissipação da potência elétrica

$$P_{\text{total}} \approx V_{CE} I_C$$

- O aquecimento aumenta a geração de portadores minoritários produzindo um acréscimo na corrente de fuga no coletor

$$I_{CEO} \approx \beta I_{CBO}$$

- Uma maior corrente de fuga provoca uma maior corrente de coletor

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

- O acréscimo em I_C promove o aumento da potência dissipada no transistor

$$P_{\text{total}} \approx V_{CE} I_C$$

e o ciclo se repete, podendo levar a uma autodestruição do transistor.

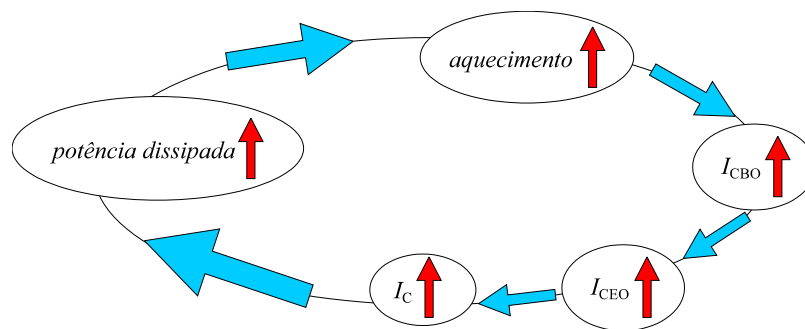


Fig.14 Representação do ciclo da avalanche térmica em um transistor.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual a potência dissipada em um transistor de silício *npn* submetido às condições elétricas: $I_B = 20 \mu\text{A}$, $V_{BE} = 0,6 \text{ V}$, $I_C = 2 \text{ mA}$ e $V_{CE} = 10 \text{ V}$?
2. O que é resistência térmica?
3. Quais os fatores que influenciam a potência dissipada em um transistor?
4. O que é potência de dissipação máxima de um transistor?
5. Determine a potência de dissipação máxima de um transistor BC548 operando a uma temperatura ambiente de $100 \text{ }^\circ\text{C}$.
6. O que são portadores majoritários e minoritários em um cristal semiconductor?
7. Sob que polarização de uma junção *pn* se torna importante o movimento de portadores minoritários?
8. Defina os parâmetros I_{CB0} e I_{CE0} .
9. Por que a maioria de componentes semicondutores é fabricada com cristais de silício?
10. O que é disparo térmico e que consequência pode provocar em um transistor?

BIBLIOGRAFIA

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Waldir João. Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos. 7. ed. São Paulo, Érica, 1983. 289p.

ELETRÔNICA MODULAR PANTEC. O transistor; princípios básicos. s.n.t. (curso básico, 4)

SENAI/DN. Transistores. Por Antônio Abel Correia Villela. Rio de Janeiro, Divisão de Recursos Humanos, 1977. 81p. (Publicações Técnicas, 7)

MILLMAN, Jacob e HALKIAS, Christos C., Integrated electronics: analog and digital circuits and systems, São Paulo, McGraw-Hill, 1972.