

Eletrônica



A n
a
l
ó
g
i
c
a



Aluno: _____

1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	64	*****																																																											
A																																																								A																	
B																																																								B																	
C																																																								C																	
D																																																								D																	
E																																																								E																	

F																																																								F																	
G																																																								G																	
H																																																								H																	
I																																																								I																	
J																																																								J																	
1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	64	*****																																																											

Eletrônica Analógica

A Estrutura do átomo

O átomo é formado basicamente por 3 tipos de partículas elementares: Elétrons, prótons e nêutrons. A carga do elétron é igual a do próton, porém de sinal contrário. Os elétrons giram em torno do núcleo distribuindo-se em diversas camadas, num total de até sete camadas. Em cada átomo, a camada mais externa é chamada de valência, e geralmente é ela que participa das reações químicas.

Todos os materiais encontrados na natureza são formados por diferentes tipos de átomos, diferenciados entre si pelos seus números de prótons, elétrons e nêutrons. Cada material tem uma infinidade de características, mas uma especial em eletrônica é o comportamento à passagem de corrente. Pode-se dividir em três tipos principais:

Condutores, isolantes e semicondutores:

Denomina-se condutor as substâncias nas quais os elétrons se locomovem com facilidade por estarem fracamente ligados aos átomos. Nos condutores, os elétrons mais distantes do núcleo abandonam o átomo adquirindo liberdade de movimento: são os elétrons livres. Num condutor eletrizado as cargas elétricas se locomovem na superfície.

Materiais isolantes: Substâncias que conduzem muito pouca ou nenhuma corrente elétrica; substância de elevada resistividade.

Uma substância cuja condutividade está situada entre o dos condutores e dos isolantes é um semicondutor (Exemplo: Silício, Germânio).

CRISTAIS

Os raios X e outros métodos revelam que a maioria dos metais e semicondutores possuem estrutura cristalina. Um cristal consiste em um conjunto de átomos ou moléculas (íons¹, se falarmos rigorosamente) construído por uma repetição regular em três dimensões de alguma unidade estrutural fundamental.

Um átomo de silício isolado possui quatro elétrons na sua órbita de valência; porém para ser quimicamente estável, precisa de oito elétrons nesta órbita. Poderá, por isso, combinar-se com outros átomos, de forma a completar os oito elétrons da sua órbita de valência.

Quando os átomos de silício combinam-se para formar um sólido, eles se arranjam numa configuração ordenada chamada cristal. As forças que mantêm os átomos unidos são conhecidas como ligações covalentes. O átomo de silício posiciona-se entre outros quatro átomos de silício. Cada vizinho compartilha então um elétron com o átomo central. Dessa forma, o átomo central

apanha quatro elétrons, o que lhe dá um total de oito elétrons na órbita de valência².

Os oito elétrons não pertencem exclusivamente ao átomo central; eles são compartilhados pelos quatro átomos de volta. Como as estruturas internas adjacentes possuem carga positiva líquida, elas atraem os elétrons em comum, criando forças iguais e opostas. Essa atração mútua em sentidos opostos é a ligação covalente, a cola que mantém os átomos unidos.

Semicondutor intrínseco: aquele no qual cada átomo que forma o cristal é do mesmo elemento.

Semicondutor extrínseco: apresenta átomos de impurezas na estrutura do cristal.

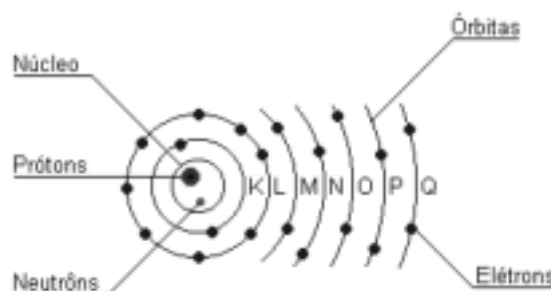
¹ Átomo ou grupamento de átomos com excesso ou com falta de carga elétrica negativa.

² O número de ligações que um átomo ou um radical pode efetuar com outros átomos, ou outros radicais, sob forma estável, para constituir uma molécula ou outro radical.

BANDAS DE ENERGIA

Na Figura ao lado se apresenta o modelo atômico de Bohr. Neste modelo, o átomo está dividido em duas partes: o núcleo e a eletrosfera.

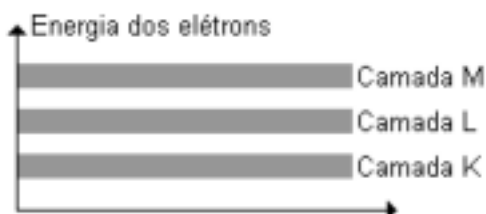
No núcleo encontram-se os prótons e os nêutrons. Já na eletrosfera estão os elétrons, distribuídos em sete camadas eletrônicas ou bandas de energia: K, L, M, N, O, P e Q.



Cada banda de energia pode conter um número máximo de elétrons, como apresentado na Tabela abaixo:

Banda de energia				N	O	P	Q
N.º máximo de elétrons							

Quanto maior a energia do elétron, maior é o raio de sua órbita ($Q > P > O > \dots$) e mais fracamente ele está ligado ao núcleo. Pode-se observar os níveis de energia de um átomo na Figura ao lado.

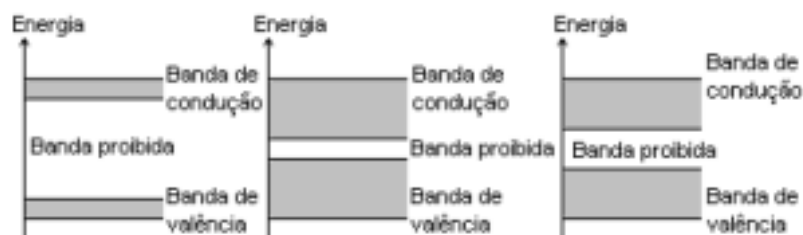


Um elétron na sua órbita gira com uma certa velocidade (energia cinética), fazendo com que sobre ele exista uma força centrífuga, F_c . Além disso, o núcleo também exerce sobre este elétron uma força, denominada de força de atração eletrostática F_e . O equilíbrio destas duas forças torna o elétron estável na sua órbita.

A última órbita de um átomo é denominada de banda de valência. A valência de um átomo é o número de elétrons da banda de valência. São estes elétrons que farão ligações químicas para completar o número máximo de elétrons da banda de valência, de modo a tornar o átomo estável.

Os elétrons que estão na banda de valência têm mais facilidade para sair do átomo, quando recebem um acréscimo de energia, sob a forma de luz ou calor. Ao receberem este acréscimo de energia, os elétrons tornam-se livres, saem da banda de valência e dirigem-se para a banda de condução, onde sob a ação de um campo elétrico formam a corrente elétrica.

Entre as bandas de valência e de condução há uma região onde não é possível existir elétrons, denominada de banda proibida. Esta banda proibida define o comportamento elétrico do material. Assim, quanto maior a banda proibida, maior será a quantidade de energia necessária para retirar um elétron da banda de valência e levá-lo para a banda de condução. A Figura abaixo mostra as características das bandas de energia para Materiais isolantes, condutores e semicondutores, respectivamente.



Os materiais semicondutores são sólidos ou líquidos, capazes de mudar com certa facilidade de sua condição de isolante para a de condutor. Isto é, podem sofrer grandes alterações em sua condutividade, pois a quantidade de energia necessária para retirar um elétron da banda de valência e levá-lo para a banda de condução é intermediária entre a energia necessária para o isolante e o condutor. Em baixas temperaturas, os semicondutores puros comportam-se como isolantes. Sob temperaturas mais altas, ou luz ou com a adição de impurezas, porém, pode ser aumentada drasticamente a sua condutividade, podendo-se alcançar níveis que se aproximam dos metais.

2/70

Eletrônica Analógica

LACUNAS

Quando a energia externa eleva um elétron de valência para um nível mais alto (órbita maior), o elétron que sai deixa um vazio na órbita mais externa. Chamamos esse vazio lacuna. Estas lacunas constituem uma das razões que fazem os diodos e os transistores trabalhar da forma como o fazem.

Em temperaturas muito baixas (por exemplo 0 K) a estrutura cristalina é semelhante à estrutura ideal mostrada na Fig. 1, e o cristal comporta-se como um isolante, pois não possui portadores livres de eletricidade; contudo, em temperatura ambiente, algumas das ligações covalentes são “quebradas” devido a energia térmica fornecida ao cristal, podendo então ocorrer condução. Esta situação está ilustrada na Fig. 2. Nesta figura vemos um elétron, que fazia parte de uma ligação covalente, deslocando-se randomicamente através da rede cristalina. A energia E_G necessária para “quebrar” essa ligação covalente é aproximadamente 0,72 eV para o germânio e 1,1 eV para o silício em temperatura ambiente. A ausência de elétron na ligação covalente é representada pelo pequeno círculo na Fig. 2, e uma tal ligação covalente incompleta é chamada lacuna. A importância da lacuna está em poder ser usada, efetivamente como portador de eletricidade, comparável ao elétron livre.

O mecanismo qualitativo pelo qual uma lacuna contribui para a condutividade é o seguinte quando uma ligação é incompleta, tal que existe uma lacuna, é relativamente fácil de ser preenchida por um elétron de valência que deixa uma ligação covalente de um átomo vizinho, este elétron, ao sair da ligação covalente, deixa outra lacuna. Assim, efetivamente, a lacuna se move

na direção oposta à direção do elétron. Esta lacuna, nesta nova posição, pode agora ser preenchida por um elétron oriundo de outra ligação covalente, e a lacuna se movera na direção oposta ao movimento do elétron. Temos, assim, um mecanismo para a condução da eletricidade que não envolve elétrons livres.

Como vimos as lacunas num semicondutor também produzem uma corrente. Isto é o que faz os semicondutores serem sensivelmente diferentes de um fio de cobre. Em outras palavras, um semicondutor oferece dois trajetos para a corrente, um através da banda de condução (órbitas maiores) e outro da banda de valência (órbitas menores).

Ocasionalmente, a órbita da banda de condução de um átomo pode interceptar a órbita da lacuna de outro. Por isso é que é tão freqüente um elétron da banda de condução passar para uma lacuna. Este desaparecimento de um elétron livre e de uma lacuna é chamado de recombinação. Quando ocorre a recombinação a lacuna não se desloca mais para lugar algum, ela desaparece.

A recombinação está constantemente acontecendo num semicondutor. Isto poderia eventualmente preencher todas as lacunas e estas só não são preenchidas porque a energia térmica incidente mantém a produção de novas lacunas elevando os elétrons de valência até a banda de condução. O tempo médio entre a criação e o desaparecimento de um par elétron lacuna é chamado tempo de vida. O tempo de vida varia de uns poucos nanossegundos até vários microssegundos, dependendo de quão perfeita é a estrutura do cristal e de outros fatores.

DOPAGEM

Impurezas aceitadoras e doadoras

Se ao silício ou ao germânio intrínseco, for adicionada uma pequena quantidade (percentagem) de átomos trivalentes (boro, gálio ou índio) ou pentavalentes (antimônio, fósforo e arsênico), teremos um semicondutor dopado, impuro ou extrínseco,

Doadores (Semicondutor Tipo-n): Para se conseguir mais elétrons na banda de valência, podemos acrescentar átomos pentavalentes; estes átomos tem cinco elétrons na órbita de valência. Depois de acrescentarmos átomos pentavalentes a um cristal de silício puro, ainda teremos uma grande quantidade de átomos de silício. Mas de vez em quando encontramos um átomo pentavalente entre quatro vizinhos, como mostra a Fig. 3a. O átomo pentavalente tinha inicialmente cinco elétrons na sua órbita de valência. Depois de formar ligações covalentes com

3/70

Eletrônica Analógica

os quatro vizinhos, este átomo central tem um elétron a mais que sobra. Como a órbita de valência não pode conter mais de oito elétrons, o elétron que sobra precisa viajar numa órbita da banda de condução.

A Fig. 3b mostra as bandas de energia de um cristal que foi dopado com uma impureza pentavalente. Temos um grande número de elétrons da banda de condução produzido principalmente pela dopagem. Existem apenas algumas lacunas, criadas pela energia térmica. Chamamos os elétrons de portadores majoritários e as lacunas de portadores minoritários. O silício dopado dessa forma é conhecido como um semicondutor do tipo-n, onde o n significa negativo.

Para terminar, os átomos pentavalentes são chamados freqüentemente átomos doadores porque eles produzem elétrons de banda de condução. Exemplos de impurezas doadoras são o arsênio, o antimônio e o fósforo.

Aceitadores (Semicondutor Tipo-p): Usando uma impureza trivalente (uma com três elétrons na órbita mais externa) podemos dopar um cristal para obter lacunas adicionais. Depois de adicionarmos a impureza, verificamos que cada átomo trivalente está cercado por quatro vizinhos como mostra a Fig. 4a. Como cada átomo trivalente traz com ele somente três elétrons na órbita de valência, apenas sete elétrons viajarão na sua órbita de valência. Em outras palavras,

aparece uma lacuna em cada átomo trivalente. Controlando-se a quantidade de impureza adicionada, pode-se controlar o número de lacunas no cristal dopado.

Um semiconductor dopado com uma impureza trivalente é conhecido como um semi condutor do tipo-p; a letra p significa positivo. Como mostra a Fig. 4b, as lacunas de um semiconductor tipo-p excedem de longe os elétrons da banda de condução. Por esta razão, as lacunas são os portadores majoritários num semiconductor tipo-p, enquanto os elétrons de banda de condução constituem os portadores minoritários.

Os átomos trivalentes também são conhecidos como átomos aceitadores porque cada lacuna que eles fornecem pode aceitar um elétron durante a recombinação. Exemplos de impurezas aceitadoras são o alumínio, o boro e o gálio.

Figuras

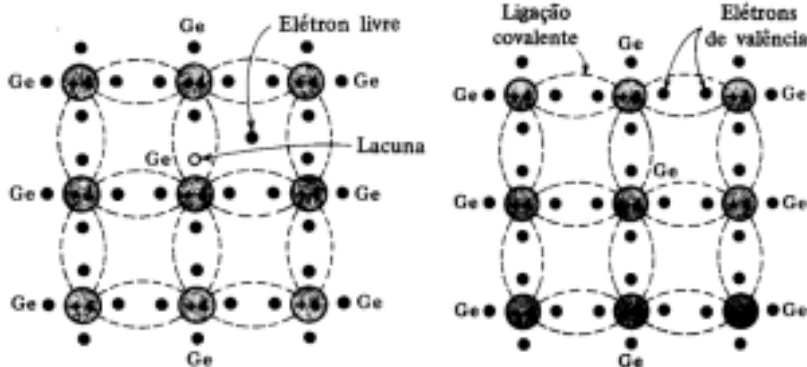


Fig.1 Fig. 2

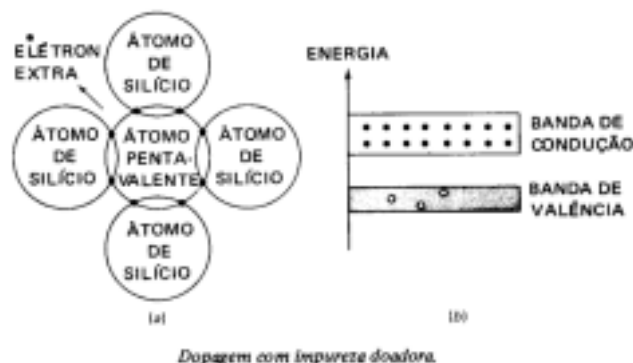
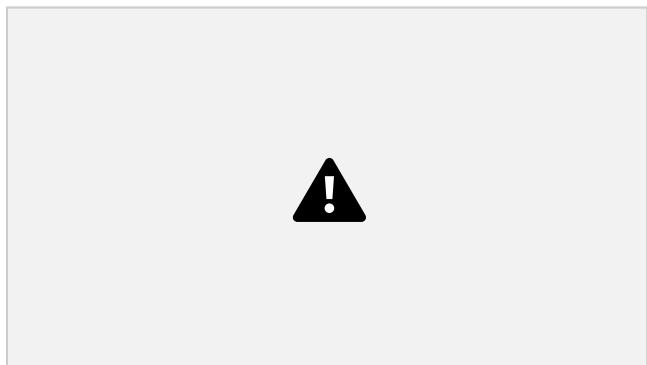


Fig. 3 Fig. 4

PROPRIEDADES DO SILÍCIO E DO GERMÂNIO

Propriedades Ge

Si
14
28,1
2,33
12
$5,0 \times 10^{22}$
1,21

1,1
230.000

Número atômico 32 Peso atômico 72,6 Densidade, g/cm³ 5,32 Constante dielétrica (relativa) 16 Átomos/cm³ $4,4 \times 10^{22}$ E_{GO}, eV, a 0 K 0,785 E_{GO}, eV, a 300 K 0,72 Resistividade intrínseca, Ω-cm, a 300 45

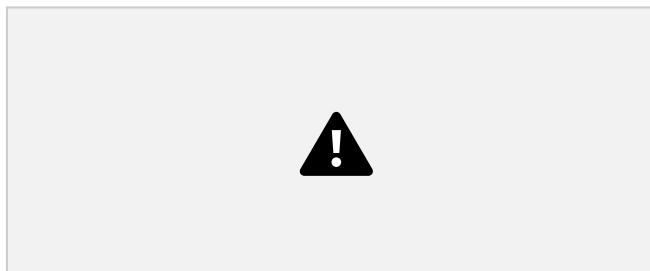
SILÍCIO VERSUS GERMÂNIO

O germânio, um outro elemento tetravalente foi amplamente usado no início do estudo dos semicondutores. Atualmente, porém, é raramente usado em projetos novos. À temperatura ambiente um cristal de silício não tem praticamente elétrons livres se comparado ao cristal de germânio. Esta é a razão principal que fez silício tornar-se totalmente superior ao germânio na fabricação de diodos, transistores e de outros componentes semicondutores.

O DIODO NÃO POLARIZADO

É possível se produzir um cristal como o da Fig. 1 a, isto é, metade do *tipo-p* e metade do tipo-*n*. A junção é onde as regiões tipo-*p* e *tipo-n* se encontram. Um cristal pn como este é comumente conhecido como *diodo*.

A Fig. 1 a mostra o cristal *pn* no instante de sua formação. O lado *p* tem várias lacunas (portadores majoritários) e o lado *n* possui vários elétrons livres (também portadores majoritários). O diodo da Fig. 1 a é não polarizado, o que quer dizer que não há nenhuma tensão externa aplicada a ele.



CAMADA DE DEPLEÇÃO

Devido a sua repulsão mútua, os elétrons livres no lado *n* difundem-se ou espalham-se em todas as direções; alguns difundem-se através da junção. Quando um elétron livre sai da região *n*, a sua saída cria um átomo carregado positivamente (um íon positivo) na região *n*. Além disso, à medida que ele penetra na região *p*, o elétron livre toma-se um portador minoritário. Com tantas lacunas em volta dele, este portador minoritário tem um curto tempo de vida; logo depois de entrar na região *p*, o elétron livre preencherá uma lacuna. Quando isto ocorre, a lacuna desaparece e o átomo associado torna-se carregado negativamente (um íon negativo).

Cada vez que um elétron difunde-se através da junção, ele cria um par de íons. A Fig. 1 b mostra estes íons de cada lado da junção. Os círculos com sinal mais são os íons positivos, e os círculos com sinal menos são os íons negativos. Os íons estão fixos na estrutura do cristal por causa da ligação covalente e não podem se deslocar livremente como os elétrons livres e as lacunas.

Chamamos a esta região *camada de depleção*.

BARREIRA DE POTENCIAL

Além de um certo ponto, a camada de depleção age como uma barreira impedindo a continuação da difusão de elétrons livres através da junção. Por exemplo, imagine um elétron livre na região n difundindo para a esquerda para o interior da camada de depleção (veja a Fig. 1 b). Aqui ele encontra uma parede negativa de íons que o repele de volta para a direita. Se o elétron livre tiver energia suficiente, ele pode romper a parede e penetrar na região p , onde encontra uma lacuna e cria um outro íon negativo.

A intensidade da camada de depleção continua aumentando com cada elétron que a atravessa até que se atinja um equilíbrio. Neste ponto a repulsão interna da camada de depleção interrompe a difusão dos elétrons livres através da junção.

A diferença de potencial através da camada de depleção é chamada *barreira de potencial*. A 25 °C, esta barreira de potencial é aproximadamente igual a 0,7 V para os diodos de germânio tem uma barreira de potencial de 0,3 V.)



POLARIZAÇÃO DIRETA

A Fig. 2 mostra uma fonte cc aplicada através de um diodo. O terminal positivo da fonte está ligado ao material tipo-p, e o terminal negativo ao material tipo-n. Chamamos uma ligação desse tipo de *polarização direta*.

CORRENTE DIRETA ALTA

A polarização direta pode produzir uma alta corrente-direta. O terminal negativo da fonte repele os elétrons livres da região n em direção à junção. Estes elétrons com energia adicional podem atravessar a junção e encontrar as lacunas. A recombinação ocorre em distâncias variáveis a partir da junção, dependendo de até onde um elétron livre pode evitar encontrar uma lacuna.

As chances de que a recombinação ocorra perto da junção são altas.

A medida que os elétrons encontram as lacunas, eles se tornam elétrons de valência. Então, caminhando como elétrons de valência, continuam a se deslocar para a esquerda através das lacunas no material p . Quando os elétrons de valência atingem a extremidade esquerda do cristal, eles abandonam o cristal e escoam para o terminal positivo da fonte.



POLARIZAÇÃO REVERSA

Se você reverter a polarização da fonte cc, reverterá a polarização do diodo, como mostra a Fig. 3. Agora o + é ligado ao lado n e o - ao lado p .

CAMADA DE DEPLEÇÃO

A polarização reversa da Fig. 3 força os elétrons livres na região n a se afastarem da junção em direção ao terminal positivo da fonte; as lacunas da região p também se deslocam da junção para o terminal negativo. Os elétrons que saem deixam mais íons positivos próximos à junção, e as lacunas ao se afastarem deixam mais íons negativos. Portanto a camada de depleção fica mais larga. Quanto maior a polarização reversa, maior torna-se a camada de depleção. A camada de depleção para de aumentar quando a sua diferença de potencial se iguala à tensão da fonte.

A Fig. 3 é uma forma alternativa de se visualizar a mesma idéia. Logo que se aplica a polarização reversa, os elétrons da banda de condução e as lacunas deslocam-se afastando-se da junção. A camada de depleção torna-se maior até que a sua diferença de potencial se iguale à tensão da fonte. Quando isto ocorre, os elétrons livres e as lacunas param os seus movimentos.

CORRENTE DE PORTADORES MINORITÁRIOS

A corrente reversa produzida pelos portadores minoritários é chamada corrente de saturação (I_S). A corrente de saturação somente sofre influência da temperatura.

CORRENTE DE FUGA SUPERFICIAL

Corrente extremamente pequena produzida por impurezas da superfície que criam um trajeto ôhmico para a corrente (I_{FS}).

CORRENTE REVERSA

As folhas de dados informativos sobre diodos englobam I_S e I_{FS} numa única corrente chamada corrente reversa I_R ; geralmente ela é especificada para um dado valor de tensão reversa V_R e à temperatura ambiente T_A .

TENSÃO DE RUPTURA

Se você aumentar a tensão reversa, positivamente atingirá um ponto de ruptura, chamado tensão de *ruptura* do diodo. Para diodos retificadores (aqueles otimizados para conduzir melhor num sentido do que no outro), a tensão de ruptura é geralmente maior do que 50 V. Uma vez atingida a tensão de ruptura, o diodo pode conduzir intensamente.

Na polarização reversa, o elétron livre produzido termicamente na camada de depleção é empurrado para o terminal positivo. À medida que se desloca, ele ganha velocidade. Quanto maior a polarização reversa, mais rápido desloca-se o elétron (o que equivale a ele ganhar mais energia). Pouco depois o elétron livre pode colidir com um elétron de valência. Se o elétron livre tiver energia suficiente, ele pode desalojar o elétron de valência, de modo a formar dois elétrons livres. Agora os dois podem se acelerar e desalojar outros elétrons de valência até ocorrer a uma avalanche total. Por causa do grande número de elétrons livres, o diodo conduzirá intensamente e será danificado pela excessiva potência dissipada.

Não se permite na maioria dos diodos que cheguem ao rompimento. Em outras palavras, através de um projeto conveniente, a tensão reversa através de um diodo retificador é sempre mantida abaixo da sua tensão de ruptura. Não há nenhum símbolo padrão para a tensão de ruptura. Tem sido simbolizada em várias folhas de dados de especificação de componentes da seguinte forma:

$V_{(BR)}$: tensão de ruptura

PIV: tensão reversa de pico

BV: tensão de ruptura

V_{RWM} : tensão reversa máxima de trabalho

PRV: tensão reversa de pico

V_{RM} : tensão reversa máxima

e outras. Algumas delas são especificações cc e outras especificações ca. Você terá de consultar folhas de dados individuais para as condições fixadas nestas especificações de ruptura.

Dielétrico

- Substância ou objeto isolador da eletricidade.

Rigidez dielétrica.

- A intensidade máxima de um campo elétrico a que pode ser sujeito um dielétrico sem que através dele passe uma descarga elétrica.

Gradiente

- Medida da variação de determinada característica de um meio (tais como a pressão atmosférica, a temperatura, etc.) de um ponto para outro desse meio.

O transporte de cargas em um cristal pode ocorrer sob influência de um campo elétrico (corrente de condução), e também devido a um gradiente de concentração não uniforme (corrente de difusão).

-
1. Explicar porque um semicondutor se comporta como um isolante a 0 K e por que sua condutividade aumenta com a temperatura?
 2. Qual a diferença entre um semicondutor intrínseco e um semicondutor extrínseco?
 3. Definir lacunas em um semicondutor?
 4. Como uma lacuna contribui para a condução?
 5. Qual a relação do número de lacunas e elétrons livres em um semicondutor puro?
 6. Qual a diferença entre uma corrente elétrica que flui através de um metal e de um semicondutor?
 7. Citar dois processos físicos para aumentar a condutividade de um semicondutor intrínseco?
 8. Definir impurezas doadoras e diga que tipo de semicondutor extrínseco pode ser formado (n ou p) acrescentando-se tais impurezas a um semicondutor intrínseco?
 9. Definir impurezas aceitadoras e diga que tipo de semicondutor extrínseco pode ser formado (n ou p) acrescentando-se tais impurezas a um semicondutor intrínseco?
 10. Cite três exemplo de impurezas aceitadoras.
 11. Cite três exemplo de impurezas doadoras.
 12. À temperatura ambiente um cristal de silício não tem praticamente elétrons livres se comparado ao cristal de germânio. Esta é a razão principal que fez o silício tornar-se totalmente superior ao germânio na fabricação de diodos, transistores e outros componentes semicondutores. Explique tal afirmação.
 13. De que é formado um diodo?
 14. Mostre o fenômeno da formação da camada de depleção em um diodo não polarizado (utilize desenhos).
 15. Explique o que ocorre durante a polarização direta em um diodo (utilize desenhos).
 16. Explique o que ocorre durante a polarização reversa em um diodo (utilize desenhos).
 17. A

largura da camada de depleção aumenta ou diminui quando um diodo é reversamente polarizado? O que acontece com o potencial da junção?

18. Como varia a corrente de saturação reversa de um diodo p-n com a temperatura? 19. Como ocorre a corrente de fuga superficial em um diodo?

20. Descrever o mecanismo físico da ruptura por avalanche.

Resistência de Corpo

Um semiconductor dopado ainda possui resistência. Chamamos esta resistência de resistência de corpo. Um semiconductor levemente dopado possui uma resistência de corpo alta. À medida que a dopagem aumenta a resistência de corpo diminui. A resistência de corpo também é chamada de resistência ôhmica porque ela obedece à lei de Ohm; isto é, a corrente através desta resistência é proporcional à tensão aplicada. Assim, o gráfico da corrente versus tensão é linear.

O GRÁFICO DO DIODO

Montando o circuito da Fig. 1, podemos medir a corrente e a tensão de um diodo. Com a polaridade da fonte conforme mostra a Fig. 1, o diodo está polarizado diretamente. Quanto maior a tensão da fonte, maior a corrente do diodo. Variando-se a tensão da fonte, pode-se medir a corrente do diodo (ligando um amperímetro em série) e a tensão do diodo (ligando um voltímetro

em paralelo com o diodo). Fazendo-se o gráfico das correntes e das tensões correspondentes, obtêm-se o gráfico região direta da Fig. 2. Se

invertermos a tensão da fonte, obteremos leituras para a região reversa. Estas leituras serão extremamente pequenas abaixo do ponto de ruptura.

Como podemos observar, o gráfico mostrado na Fig. 2 não é linear, o que caracteriza a não-linearidade do diodo, contrastando com a linha reta que obtemos para o resistor (componente linear).



Tensão de Joelho

Ao se aplicar a polarização direta, o diodo não conduz intensamente até que se ultrapasse a barreira de potencial. À medida que nos aproximamos do potencial da barreira (por volta de 0,7 V para um diodo de silício), os elétrons livres e as lacunas começam a atravessar a junção em grandes quantidades. A partir daí a corrente começa a subir rapidamente. Acima de 0,7 V, pequenos acréscimos na tensão

produzem grandes aumentos na corrente.

A tensão para a qual a corrente começa a aumentar rapidamente é chamada de *tensão de joelho* ou tensão de *limiar*. Para um diodo de silício esta tensão é igual ao potencial da barreira, em torno de 0,7 V (O diodo de germânio tem uma tensão de limiar de 0,3 V).

Resistência do Carregamento

Acima da tensão do joelho, a corrente do diodo aumenta rapidamente; pequenos aumentos na tensão do diodo produzem grandes acréscimos na corrente do diodo. A razão é a seguinte: depois de ultrapassado o potencial da barreira, tudo o que impede a corrente é a resistência de corpo ou a resistência ôhmica das regiões p e n. Esta resistência é linear. Em outras palavras, um diodo associa uma resistência altamente não-linear (a junção) a uma resistência de corpo que é linear (as regiões p e n fora da camada de depleção). Abaixo de 0,7 V predomina a não-linearidade da junção, acima de 0,7 V a linearidade da resistência de corpo.

9/70

Eletrônica Analógica

REGIÃO REVERSA

Quando você reverte a polarização do diodo da Fig. 1, obtém uma corrente reversa extremamente pequena (às vezes chamada corrente de *fuga*). Se você aumentar a tensão reversa o suficiente, eventualmente atingirá a tensão de ruptura do diodo (alguns diodos têm uma tensão de ruptura de centenas de volts). Como já é de seu conhecimento, um diodo retificador deve funcionar sempre abaixo da tensão de ruptura. Para estar seguro disto, o projetista deliberadamente escolhe o tipo de diodo cuja tensão de ruptura seja maior do que a tensão reversa máxima esperada durante o funcionamento normal.

ESPECIFICAÇÕES DE POTÊNCIA E DE CORRENTE

Um diodo retificador é otimizado para o seu funcionamento unilateral. Você pode pensar num diodo como um condutor numa direção só porque ele apresenta uma baixa resistência direta e uma resistência reversa alta. Uma forma de se destruir um diodo é excedendo a sua tensão reversa de ruptura.

Uma outra forma de arruiná-lo é excedendo a sua *especificação máxima de potência*. Qualquer componente dissipa uma certa potência dada pelo produto da sua tensão pela corrente. Se essa potência dissipada for muito alta, o componente se queimará deixando-o em curto ou aberto. Tipicamente, a tensão no ponto de destruição de um diodo é bem acima da tensão de joelho, um volt ou mais. O produto dessa tensão pela corrente produz tanto calor que o diodo é destruído.

Os fabricantes às vezes especificam a potência do diodo nas folhas de dados. Por exemplo, o IN914 tem uma especificação máxima de potência de 250 mW. Mais frequentemente, as folhas de dados informam somente a *corrente máxima* que o diodo pode suportar. Isto é mais conveniente para se medir e para se trabalhar.

Como exemplo, a folha de dados do IN4003 não inclui a especificação máxima de potência, mas ela especifica uma corrente cc direta máxima de 1 A. Na verdade, estamos sendo informados que se permitirmos uma corrente de regime maior do que 1 A através do IN4003, ele poderá ser destruído ou terá a sua vida útil reduzida.

Geralmente as folhas de dados definem duas classes de diodos retificadores: diodos para *pequenos sinais* (aqueles com uma especificação de potência menor do que 0,5 W) e *retificadores* (aqueles com uma especificação de potência maior do que 0,5 W). O IN914 é um diodo de pequeno sinal porque a sua especificação de potência é de 0,25 W; o IN4003 é um retificador porque a sua potência especificada é de 1 W.

Resistor Limitador de Corrente

Voltando à Fig. 1, R_S é chamado resistor *limitador de corrente*. Quanto maior for R_S , menor será a corrente do diodo. Em outros circuitos com diodos que serão discutidos, sempre haverá um resistor limitador de corrente em série com o diodo. O projetista escolhe um valor de R_S que mantenha a corrente direta máxima abaixo da especificação da corrente máxima do diodo.

Mesmo em circuitos onde você pode não ver um resistor (como uma caixa preta ligada ao diodo), a resistência Thevenin que se opõe ao diodo pode ser suficiente para manter a corrente abaixo da especificação de corrente máxima do diodo. O caso é que sempre deverá haver resistência suficiente em série com o diodo para limitar a sua corrente a um valor menor do que a corrente máxima especificada.

10/70

Eletrônica Analógica

Os diodos retificadores e de pequeno sinal são otimizados para a retificação. Mas isto não é tudo o que um diodo pode fazer. Discutiremos a seguir os diodos usados em aplicações não retificadoras.

O DIODO ZENER

Os diodos retificadores e de pequeno sinal nunca devem operar na região de ruptura porque isto pode danificá-los. Um diodo zener é diferente; é um diodo de silício que o fabricante otimiza para trabalhar na região de ruptura. O diodo zener ou diodo de ruptura é a parte mais importante dos reguladores de tensão, circuitos que mantêm a tensão da carga praticamente constante apesar das grandes variações na tensão da linha e da resistência de carga.

GRÁFICO $I \times V$



A Fig. 1a mostra o símbolo esquemático de um diodo zener; a Fig. 1b constitui um símbolo alternativo. Em qualquer símbolo, as linhas assemelham-se a um que representa zener. Variando-se o nível de dopagem dos diodos de silício, o fabricante pode produzir diodos zener com tensões de ruptura de 2 até 200 V. Estes diodos podem funcionar em qualquer uma das três regiões: direta, de fuga, ou de ruptura.

A Fig. 1c mostra o gráfico $I \times V$ de um diodo zener. Na região direta, ele começa a conduzir por volta de 0,7 V, exatamente como um diodo de silício comum. Na região de fuga (entre zero e a ruptura), ele apresenta apenas uma pequena fuga ou corrente reversa. Num diodo

zener, a ruptura tem um joelho muito pronunciado, seguindo de um aumento de corrente praticamente vertical. A tensão é praticamente constante, aproximadamente igual a V_Z em quase toda a região de ruptura. As folhas de dados geralmente especificam o valor de V_Z numa determinada corrente de teste I_{ZT} .

Especificações Máximas

A potência dissipada num diodo zener é igual ao produto da sua tensão pela corrente.

$$P_Z = V_Z \times I_Z$$

Desde que P_Z seja menor do que a especificação de potência, o diodo zener pode funcionar na região de ruptura sem ser destruído. Os diodos zener comercialmente disponíveis têm especificações de potência que variam de 1/4W até mais de 50W, mantendo tensões de vários Volts até várias centenas de Volts.

Regulação de Tensão



O diodo zener às vezes é chamado diodo regulador de tensão porque mantém uma saída constante, mesmo que a corrente que passa por ele varie. Em funcionamento normal, você tem que reverter a polarização do diodo zener, como mostra a Fig. 2. Além disso, para produzir a ruptura, a tensão V_S da fonte deve ser maior do que a tensão zener de ruptura V_Z , sempre usando um resistor R_S em série para limitar a corrente zener num nível abaixo da sua

especificação de corrente; caso contrário, o diodo zener se queima como qualquer componente comum com excessiva dissipação de potência.

11/70

Eletrônica Analógica

A tensão pelo resistor em série é igual à diferença entre a tensão da fonte e a tensão zener: $V_S - V_Z$.

$$\frac{V_S - V_Z}{R_S}$$

Portanto, a corrente que passa pelo resistor é:

$$I_Z = \frac{V_S - V_Z}{R_S}$$

Pelo fato deste ser um circuito com uma malha, a corrente zener I_Z é igual a I_S

COMPONENTES OPTOELETRÔNICOS

Optoeletrônica é a tecnologia que associa a óptica com a eletrônica. Este campo inclui vários componentes baseados na ação de uma junção *pn*. São exemplos de componentes optoeletrônicos os diodos emissores de luz, os fotodiodos, os optoacopladores, etc.

DIODOS EMISSORES DE LUZ (LED)



Num diodo com polarização direta, os elétrons livres atravessam a junção e combinam-se com as lacunas. À medida que esses elétrons caem de um nível mais alto de energia para um mais baixo, eles irradiam energia. Nos diodos comuns essa energia é dissipada na forma de calor. Mas no diodo emissor de luz (LED), a energia é irradiada na forma de luz. Os LEDs substituíram as lâmpadas de incandescência em várias aplicações devido a sua baixa tensão, vida longa, e rápido chaveamento liga-desliga.

Os diodos comuns são feitos de silício, um material opaco que bloqueia a passagem da luz. Os LEDs são diferentes. Usando-se elementos como o gálio, o

arsênio e o fósforo, um fabricante pode produzir LEDs que irradiam no vermelho, verde, amarelo, azul, laranja ou infravermelho (invisível). Os LEDs que produzem radiação visível são úteis em instrumentos, calculadoras, etc. Os LEDs infravermelhos encontram aplicação em sistemas de alarme contra roubo e outras áreas que exijam radiação invisível.

Tensão e Corrente do LED

Os LEDs têm uma queda de tensão típica de 1,5 a 2,5 V para correntes entre 10 e 50 mA. A queda de tensão exata depende da corrente, da cor, da tolerância do LED. Se você tiver que fazer algum projeto, precisa consultar as folhas de dados, porque as tensões do LED têm uma grande tolerância.

FOTODIODO



Como foi discutido anteriormente, um elemento de corrente reversa num diodo é o fluxo de portadores minoritários. Estes portadores existem porque a energia térmica mantém os elétrons de valência desalojados de suas órbitas, produzindo no processo elétrons livres e lacunas. A vida média dos portadores minoritários é curta, mas enquanto dura eles podem contribuir para a corrente reversa.

Quando incide energia luminosa sobre uma junção *pn*, ela também pode desalojar elétrons de valência. Colocando de outra forma, a quantidade de luz que atinge a junção pode controlar a corrente reversa de um diodo. O fotodiodo é aquele que foi otimizado na sua sensibilidade para a luz. Nesse diodo, uma janela permite que a luz passe através do invólucro e chegue até a junção. A luz incidente produz elétrons livres e lacunas. Quanto mais intensa a luz, maior o número de portadores minoritários e maior a corrente reversa.

As setas para dentro representam a luz incidente. De suma importância, a fonte e o resistor em série revertem a polarização do fotodiodo. À medida que a luz se torna mais brilhante, a corrente reversa aumenta. Com fotodiodos típicos, a corrente reversa situa-se na faixa de dezenas de microampéres.

O fotodiodo é um exemplo de um fotodetector, um componente optoeletrônico que converte a luz incidente numa quantidade elétrica.

12/70

Eletrônica Analógica

OPTOACOPLADOR

Um optoacoplador (também chamado optoisolador ou isolador opticamente acoplado) associa um LED a um fotodetector numa única embalagem. A tensão da fonte V_1 e o resistor em série R_1 produzem uma corrente através do LED. Por sua vez, a luz que sai do LED atinge o fotodiodo, e

isto estabelece a corrente reversa I_2 . Somando as tensões ao longo da malha de saída temos:

$$V_{\text{saída}} - V_2 + I_2 R_2 = 0 \text{ ou } V_{\text{saída}} = V_2 - I_2 R_2$$

Observe que a tensão de saída depende da corrente reversa I_2 . Se a tensão da entrada V_1 estiver variando, a quantidade de luz estará fluando. Isto quer dizer que a tensão de saída está variando de acordo com a tensão de entrada. É por isso

que a associação de um LED com um fotodiodo é chamada optoacoplador; o dispositivo é capaz de acoplar um sinal de entrada com um circuito de saída.

A principal vantagem de um optoacoplador é a isolamento elétrica entre os circuitos de entrada e de saída. Com um optoacoplador, o único contato entre a entrada e a saída é um feixe de luz. Por causa disso, é possível ter uma resistência de isolamento entre os dois circuitos na faixa dos milhares de megohms. Uma isolamento dessa vem a calhar em aplicações com alta tensão, onde os potenciais dos dois circuitos podem diferir de vários milhares de volts.

O DIODO SCHOTTKY

Em baixas frequências um diodo comum pode se desligar facilmente quando a polarização varia de direta para reversa. Mas à medida que a frequência aumenta, o diodo chega num ponto onde não pode se desligar suficientemente rápido para evitar uma corrente considerável durante parte do semiciclo reverso.

Armazenamento de Carga

Com um diodo polarizado diretamente, os elétrons da banda de condução difundem-se através da junção e passam para a região p antes de se recombinarem. Da mesma forma as lacunas cruzam a junção e encaminham-se para a região n antes de se recombinarem. Se a vida média for igual a $1\ \mu s$, os elétrons livres e as lacunas perduram por um intervalo de tempo médio de $1\ \mu s$ antes da recombinação ocorrer.

Por causa da vida média dos portadores minoritários, as cargas num diodo polarizado diretamente são armazenadas temporariamente em diferentes bandas de energia próximas da junção. Quanto maior a corrente direta, maior o número de cargas armazenadas. Esse efeito é conhecido como *armazenamento de carga*.

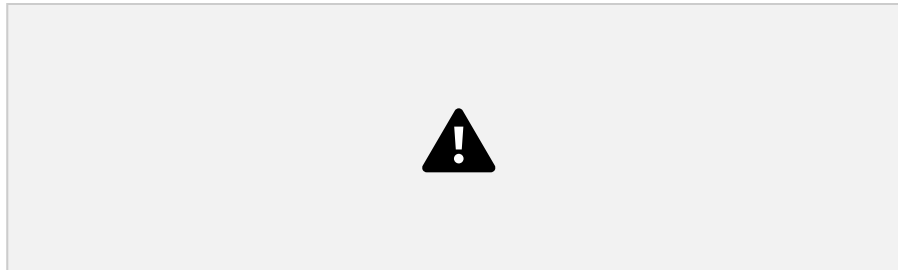
Tempo de Recuperação Reversa

O armazenamento de carga é importante quando você tenta chavear um diodo de ligado para desligado. Se você reverter rapidamente a polarização de um diodo, as cargas armazenadas podem fluir no sentido reverso por um curto intervalo de tempo. Quanto maior a vida média, maior o tempo durante o qual essas cargas podem contribuir para a corrente reversa.

O tempo necessário para desligar um diodo polarizado diretamente é chamado *tempo de recuperação reversa* t_{rr} . As condições para se medir t_{rr} variam de um fabricante para outro. Como referência, t_{rr} é o tempo que a corrente reversa leva para cair para 10 por cento da corrente direta.

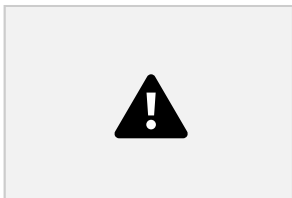
O tempo de recuperação reversa é tão curto nos diodos de pequeno sinal que você nem mesmo percebe o seu efeito em frequências abaixo de 10 MHz ou dessa ordem. Somente quando você estiver bem acima de 10 MHz é que terá que levar t_{rr} em consideração.

Efeito na Retificação



- a) Retificador de Meia onda.
- b) Saída normal.
- c) Saída distorcida com armazenamento de carga.

Eliminando a Carga Armazenada



O diodo *Schottky* emprega um metal como o ouro, a prata ou a platina em um lado da junção, e silício dopado (tipicamente do tipo n) do outro lado. Quando um diodo Schottky (também chamado diodo portador quente) está despolarizado, os elétrons livres do lado n estão em órbitas menores do que os elétrons livres do lado do metal. Esta diferença no tamanho das órbitas é chamada barreira de Schottky.

Quando o diodo está polarizado diretamente, os elétrons livres do lado n ganham energia suficiente para ocupar órbitas grandes. Por causa disso, os elétrons livres podem atravessar a junção e penetrar no metal, produzindo uma grande corrente direta. Como os metais não possuem lacunas, não há armazenamento de carga e também não haverá tempo de recuperação reversa.

A falta de armazenamento de carga significa que o diodo Schottky pode se desligar mais rápido do que um diodo comum. Na verdade, um diodo Schottky pode retificar facilmente frequências acima de 300 MHz.

Uma aplicação importante dos diodos Schottky é nos computadores digitais. A velocidade

dos computadores depende da rapidez com que seus diodos e transistores conseguem se ligar e desligar. É aí que entra o diodo Schottky. Pelo fato dele não ter armazenamento de carga, o diodo Schottky tornou-se a peça fundamental da TTL Schottky de baixa potência, um grupo de dispositivos digitais amplamente usado.

Queda de Tensão Direta

No sentido direto, um diodo Schottky tem uma tensão de trabalho de aproximadamente 0,25 V. Logo, outra aplicação importante do diodo Schottky é em retificadores de baixa tensão porque você tem que subtrair somente 0,25 V em vez de 0,7 V para cada diodo utilizado no circuito. Você verá frequentemente diodos Schottky serem usados no lugar de diodos de silício em fontes de alimentação de baixa tensão.

O VARACTOR

O *varactor* (também chamado capacitância de tensão variável, varicap, epicap e diodo de sintonia) é muito usado em receptores de televisão, receptores de FM e outros equipamentos de comunicação.

Capacitância do Diodo

Quando polarizado reversamente, um diodo de pequeno sinal tem uma resistência reversa que se situa bem na faixa dos megohms. Em baixas frequências, o diodo é comparado a um circuito aberto. Mas em frequências altas há um outro percurso para a corrente que precisa ser levado em conta.

A camada de depleção está entre a região p e a região n. Quando polarizado reversamente, um diodo de silício se assemelha a um capacitor; as regiões p e n são como as placas do capacitor, e a camada de depleção se compara ao dielétrico. O circuito externo pode carregar essa capacitância retirando elétrons de valência do lado p e adicionando elétrons livres ao lado n. A ação é a mesma que retirar elétrons de uma placa do capacitor e depositá-los na outra placa.

A capacitância do diodo que acabamos de ver acima é chamada capacitância de transição, representada por C_T . A palavra “transição” refere-se à transição do material tipo p para o material tipo n. A capacitância de transição também é conhecida como capacitância da camada de depleção, capacitância da barreira e capacitância da junção. O que torna a capacitância de transição muito útil é o seguinte: como a camada de depleção fica mais larga quanto maior a tensão reversa, a capacitância de transição torna-se menor. É como se você afastasse as placas de um capacitor. A idéia chave é que a capacitância é controlada pela tensão.

DIODOS TUNEL

Aumentando-se o nível de dopagem de um diodo, podemos fazer a ruptura ocorrer

próximo de 0 V. Além disso, uma dopagem mais pesada distorce a curva direta. Um diodo como esse é conhecido como um diodo *túnel* ou diodo de Esaki. A polarização direta produz condução imediata. A corrente atinge um valor máximo I_P , (corrente de pico) quando a tensão do diodo iguala-se a V_P . A seguir a corrente diminui até um valor mínimo I_V (corrente de vale) a uma tensão V_V .



A região entre os pontos do pico e do vale é chamada região de *resistência negativa*. Nessa região um aumento na tensão produz uma diminuição na corrente. A resistência negativa

dos diodos túnel é útil em circuitos de alta frequência, chamados osciladores. Esses circuitos são capazes de converter potência cc em potência ca.

VARISTORES

As descargas (relâmpagos), falhas na linha de alimentação, chaveamento de carga reativa, etc. podem poluir a tensão da linha pela superposição de picos, vales e outros transitórios aos 220 Vca normais. Os vales são quedas de tensão violentas que duram cerca de microssegundos ou menos. Os picos são sobretensões rápidas de 500 até mais de 2.000 V. Em alguns equipamentos são usados filtros entre a linha de alimentação e o primário do transformador para eliminar os problemas causados pelos transitórios da linha.



O varistor, em inglês VDR, *voltage dependent resistor*, é uma resistência cujo valor nominal é uma função da própria tensão aplicada aos terminais. A elevada não linearidade do varistor é comumente utilizada na eliminação de picos de tensão introduzidos nas linhas de alimentação. Os varistores são em geral ligados em paralelo com o circuito cuja proteção garantem. Quando um transitório ocorre, o valor nominal da resistência reduz-se drasticamente, absorvendo assim os eventuais picos de corrente que, caso contrário, seriam injetados no circuito.

Esse dispositivo semicondutor pode ser comparado a dois diodos zener, um de costas para o outro com uma tensão de ruptura bem alta em qualquer sentido.

DIODOS ESPECIAIS

- 1) Qual a utilização dos diodos Zener?
- 2) O diodo Zener é otimizado pelo fabricante para trabalhar em que região da curva $I \times V$?
- 3) O que é optoeletrônica?
- 4) O que significa LED e como se processa a emissão de luz em um LED?

- 5) Quais as vantagens dos LEDs sobre as lâmpadas incandescentes?
- 6) Como é obtido LEDs que irradiam no vermelho, verde, amarelo, azul, laranja ou infravermelho?
- 7) Descreva o processo físico de um fotodiodo. Como o fotodiodo deve ser polarizado?
- 8) De que é formado os optoacopladores?
- 9) Qual a principal vantagem na utilização de optoacoplador em um circuito?
- 10) Como se processa o armazenamento de carga em um diodo?
- 11) O que é o tempo de recuperação reversa?
- 12) Quais as aplicações do diodo Schottky?
- 13) Porque não há armazenamento de carga nem tempo de recuperação reversa em um diodo Schottky?
- 14) Qual a utilização do varactor?
- 15) Qual a principal característica de um varactor?
- 16) Como podemos obter um diodo túnel ou diodo de Esaki?
- 17) Em que tipo de circuito é utilizado o diodo túnel?
- 18) Qual a utilização dos varistores?

CIRCUITOS COM DIODOS

A maioria dos circuitos eletrônicos precisam de uma tensão cc para poder trabalhar adequadamente. Como a tensão da linha é alternada, a primeira coisa a ser feita em qualquer equipamento eletrônico é converter a tensão ac em tensão cc. Analisaremos circuitos retificadores que realizam a conversão necessária de ac para cc. Incluiremos também filtros com capacitores de entrada, multiplicadores de tensão, limitadores a diodo, grampeadores, detetores de pico a pico e fonte regulada com diodo Zener.

A ONDA SENOIDAL

A onda senoidal é o mais básico dos sinais elétricos. Ela é usada frequentemente, por exemplo, em sistemas de energia elétrica. Além disso, sinais complicados podem ser reduzidos a ondas senoidais (Teorema de Fourier³).



$v =$

$$v = V_p \sin \theta$$

tensão instantânea

V_p = tensão de pico θ = ângulo em graus ou radianos

As funções seno e co-seno podem ser plotadas como funções do tempo (t) ao invés de θ .

Relação entre θ e t:

A frequência (f) da onda senoidal é o número de ciclos por segundo e existem 2π rad/ciclos, logo o número de radianos explorados por segundo é $2\pi f$. Isto define a velocidade angular (ω) do vetor de rotação. Então:

$$\omega \text{ rad/s} = 2\pi \text{ (rad)} \cdot f \text{ (Hz)} = 2\pi f$$

Desde que o ângulo de varredura em um dado tempo é dado por:

$$\theta = \omega \text{ (rad/s)} \cdot t \text{ (s)} = \omega t = 2\pi f t = \frac{2\pi}{T} t$$



Se existe um defasamento angular ϕ , chamado de ângulo de fase no instante zero (ou zero graus), o ângulo resultante θ no instante t é dado por:

$$\theta = \omega t + \phi$$

A senoide será expressa na forma: $v = V_p \sin(\omega t + \phi)$

Valor de Pico a Pico

O valor de pico a pico de qualquer sinal é a diferença entre o seu máximo e mínimo algébrico: $V_{pp} = V_{\max} - V_{\min}$

Para a senoide teremos: $V_{pp} = V_p - (-V_p) = 2V_p$

³ Um sinal periódico qualquer é composto de (ou pode ser decomposto em) uma série de ondas senoidais com frequência múltiplas inteiras da frequência fundamental f, cada uma com uma determinada amplitude e uma determinada fase, mais uma componente continua (de frequência zero).

As ondas senoidais múltiplas inteiras n da fundamental são chamadas harmônicos de ordem n.

Valor Eficaz (RMS)

Se uma tensão alternada aparecer através de um resistor, ela produzirá uma corrente alternada em fase através do resistor. O produto da tensão instantânea pela corrente dá a potência instantânea, cuja média durante um ciclo resulta numa dissipação média de potência. Em outras palavras, o resistor dissipa uma quantidade constante de calor, como se houvesse uma tensão cc através dele.

O valor RMS (raiz média quadrática) de uma onda, também chamado valor eficaz ou valor de aquecimento é definido como a tensão cc que produz a mesma quantidade de calor que a onda alternada.

$$\text{área sob a curva de } v(t) \sqrt{2}$$

período

$$v_{\text{eficaz}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

$$V_{\text{eficaz}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

Prova experimental: construindo dois circuitos: um com uma fonte cc seguida de um resistor e outro com uma fonte ca ligada a um resistor de mesmo valor. Se a fonte cc for ajustada para produzir a mesma quantidade de calor que a fonte ca, mediremos uma tensão cc igual a tensão eficaz da fonte ca.

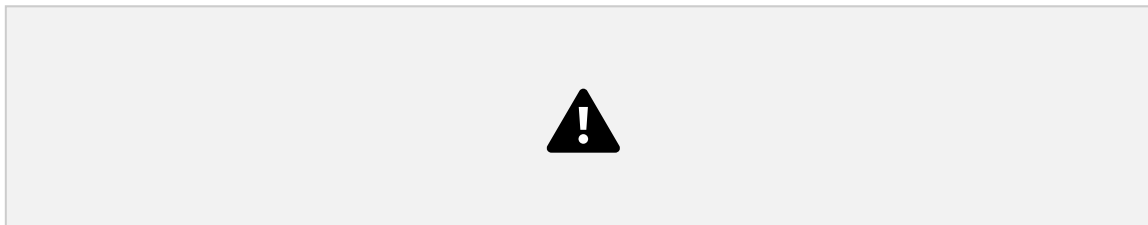
O valor RMS (raiz média quadrática) de uma onda senoidal, também chamado valor eficaz ou valor de aquecimento, é definido como a tensão cc que produz a mesma quantidade de calor que a onda senoidal.

$$V_P = 2V_{\text{rms}} \text{ ou } V_{\text{rms}} = 0,707 V_P$$

O RETIFICADOR DE MEIA ONDA

A figura abaixo mostra um circuito conhecido como retificador de meia onda. No semiciclo positivo da tensão do secundário o diodo está polarizado diretamente para todas as tensões instantâneas maiores do que a tensão de limiar (aproximadamente 0,7 V para os diodos de silício e 0,3 V para os diodos de germânio); Isto produz aproximadamente uma meia onda senoidal de tensão através do resistor de carga. O pico da tensão retificada é igual à tensão de pico do secundário menos a queda de tensão na barreira de potencial do diodo. Na metade negativa do ciclo, o diodo está com a polarização reversa. Ignorando as correntes de fuga (o mesmo que a corrente reversa), a corrente de carga cai a zero; é por esta razão que a tensão da carga cai a zero entre 180° e 360°.

Retificação



O retificador de meia onda converte a tensão de entrada ac numa tensão pulsante cc. A tensão da carga é sempre positiva ou zero, dependendo de que metade do ciclo ela se encontra. Este processo de conversão de ca para cc é conhecido como retificação.

Tensão Média Onde $V_P = V_2(\text{pico}) - 0,7 = V_2 - 0,7$

$V_{\text{média}} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi V_P \sin \theta d\theta$

A tensão média ou o valor cc do sinal de meia onda é: cc

Tensão de pico reversa: Cada diodo num retificador de meia onda deve ter uma especificação de PIV (tensão de pico inversa) maior que V_2 (pico).

19/70

O RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA



Eletrônica Analógica

A figura ao lado mostra um retificador de onda completa. Durante o semiciclo positivo da tensão do secundário, o diodo de cima está com polarização direta e o diodo de baixo com

polarização reversa, logo a corrente passa pelo diodo de cima, pelo resistor de carga e pela metade superior do enrolamento. Durante o semiciclo negativo, a corrente passa pelo diodo de baixo, pelo resistor de carga e pela metade inferior do enrolamento. A tensão de carga tem a mesma polaridade porque a corrente através do resistor de carga está no mesmo sentido, independentemente de que diodo esteja conduzindo.

Efeito do secundário com derivação central: Por causa do enrolamento do secundário com derivação central, cada circuito do diodo recebe apenas metade da tensão do secundário. V (pico)

$$\frac{V}{2} = \frac{V_2}{2}$$

$$V_2$$

$$\begin{aligned} \text{A tensão de saída de pico retificada é: } V_{\text{saída}}(\text{pico}) &= 0,7 \\ (V_{\text{cc}}): \quad &= \frac{2V(\text{pico})}{2} \end{aligned}$$

Tensão Média

$$\frac{2}{\pi}$$

$$\pi$$

$$I_{\text{cc}}$$

Especificação de corrente de diodos: A especificação de corrente de cada diodo só precisa ser maior que a metade da corrente de carga I_{cc} , pois cada diodo conduz somente durante meio ciclo. Temos então que a corrente I_{cc} através de cada diodo é de metade da corrente I_{cc} de carga.

Frequência:

Num retificador de meia onda, o período da saída é igual ao período da entrada, logo a frequência de saída é igual à frequência de entrada. Para cada ciclo na saída temos um ciclo na entrada. Com o retificador de onda completa ocorrem dois semiciclos na saída para cada ciclo na entrada. Porque o retificador de onda completa inverteu a metade negativa do ciclo da tensão de entrada. Logo a frequência de saída é igual ao dobro da frequência de entrada.

Tensão de pico reversa: Cada diodo num retificador de onda completa deve ter uma especificação de PIV (tensão de pico inversa) maior que V_2 (pico).

O RETIFICADOR EM PONTE

Os elementos essenciais de um circuito em ponte são mostrados na figura abaixo. Durante o semiciclo positivo da tensão do secundário, os diodos D_2 e D_3 estão polarizados diretamente, a tensão de carga tem a seguinte polarização – à esquerda e + à direita, D_1 e D_4 estão polarizados reversamente. Durante o semiciclo negativo os diodos D_1 e D_4 estão polarizados diretamente e a tensão da carga apresenta a mesma polarização anterior, D_2 e D_3 estão polarizados reversamente. Logo em qualquer dos dois semiciclos, a tensão de carga tem a mesma polaridade porque a corrente de carga está no mesmo sentido independentemente de que par de diodo esteja conduzindo.

**Tensão Média (V_{cc}):**

A tensão de pico da carga é: $V_{saída} \text{ (pico)} = V_2 \text{ (pico)} - 1,4 = V_{22} - 1,4$

Toda a tensão do secundário aparece através do resistor de carga, este é um dos motivos que tornam o retificador em ponte melhor do que o retificador de onda completa, onde somente metade da tensão chegava até a saída. Além disso, em transformador com derivação central que produza tensões iguais em cada metade do enrolamento secundário é difícil e caro de ser fabricado. Ao utilizar um retificador em ponte, o projetista elimina a necessidade de uma derivação central precisa; a economia compensa de longe o custo dos dois diodos adicionais.

do sinal é:

$$\text{A tensão média ou o valor cc} = \frac{2V \text{ (pico)}}{\pi} V_{saída}$$

Especificação de corrente de diodos: A especificação de corrente de cada diodo só precisa ser maior que a metade da corrente de carga cc, pois cada diodo conduz somente durante meio ciclo. Temos então que a corrente cc através de cada diodo é de metade da corrente cc de carga.

Frequência:

Como o sinal de saída é uma onda completa, a frequência de saída é o dobro da frequência de entrada.

Tensão de pico reversa: Cada diodo num retificador de onda completa deve ter uma especificação de PIV (tensão de pico inversa) maior que $V_2 \text{ (pico)}$.

✓ O retificador em ponte alcança a tensão de pico completa de um retificador de meia onda e o valor médio mais alto de um retificador de onda completa, sendo portanto a forma mais conveniente de se retificar.

Retificadores em ponte encapsulados

Os retificadores em ponte são tão comuns que os fabricantes os embalam em módulos. Por exemplo, o MDA920-3 é um conjunto retificador de ponte disponível comercialmente. Ele é formado por quatro diodos selados hermeticamente interligados e encapsulados em plástico de modo a formar um único invólucro resistente. Ele tem dois pinos de entrada para a tensão do secundário e dois pinos de saída para a resistência de carga.

O FILTRO COM CAPACITOR DE ENTRADA

A filtragem é freqüentemente realizada colocando-se um capacitor ligado em paralelo com a carga. Este sistema se baseia no fato de que o capacitor armazena energia durante o período de condução do diodo e fornece esta mesma energia para a carga durante o período em que diodo está cortado. Desse modo, o tempo durante o qual a corrente passa pela carga, R_L , é prolongado e a ondulação é consideravelmente menor. A tensão de ondulação é definida como sendo o desvio da tensão na carga a partir do seu valor médio ou c.c.

O diodo atua como uma chave que permite fornecer carga ao capacitor quando a tensão do transformador ultrapassar a tensão do capacitor, desligando a fonte de potência quando a tensão do transformador cai abaixo da tensão do capacitor.

Filtragem da Meia Onda



Filtro com capacitor de entrada. Uma fonte ca gera uma tensão senoidal com uma tensão de pico de V_p . Durante o primeiro quarto do ciclo de tensão da fonte, o diodo

está com polarização direta. Idealmente, ele se comporta como uma chave fechada. Como o diodo liga a fonte diretamente através do capacitor, o capacitor se carrega até a tensão de pico V_p .

Logo depois de passado o pico positivo, o capacitor tem V_p volts. Como a tensão da fonte é ligeiramente menor do que V_p , o diodo passa para polarização reversa e para de conduzir.

Com o diodo agora aberto, o capacitor se descarrega através da resistência de carga. Se a constante de tempo de descarga (o produto de R_L por C) é muito maior do que o período T do sinal de entrada, o capacitor perde somente uma pequena parte da sua carga durante o tempo em que está desligado do diodo.

Quando a tensão da fonte atinge novamente o seu pico, o diodo conduz durante um breve intervalo de tempo e recarrega o capacitor até a tensão de pico. Logo, depois do capacitor ter sido inicialmente carregado durante o primeiro quarto de ciclo, sua tensão é aproximadamente igual à tensão de pico da fonte.

A tensão de carga é agora uma tensão cc quase perfeita. O único desvio de uma tensão cc pura são as pequenas ondulações causadas pelas cargas e descargas do capacitor. Quanto menor a ondulação, melhor é a retificação. Uma forma de se reduzir essa ondulação é aumentar a constante de tempo da descarga, que é igual a $R_L C$.

Filtragem de Onda Completa



Uma outra forma de se reduzir a ondulação é se usar um retificador de onda completa ou um retificador em ponte; aí a frequência da ondulação será de 120 Hz em vez de 60 Hz. Neste caso, o capacitor é carregado com uma

frequência duas vezes maior e tem somente metade do tempo de descarga. Como consequência, a ondulação é menor e a tensão de saída cc se aproxima mais da tensão de pico. O retificador em ponte alimentando com filtro com capacitor de entrada é a configuração mais usada comumente.

Ângulo de Condução de um Diodo

Nos retificadores sem filtragem capacitiva, cada diodo tinha um ângulo de condução de 180° do ciclo, significando que cada diodo era ligado durante aproximadamente 180° do ciclo. Nos retificadores de pico, que estamos discutindo agora, cada diodo tem um ângulo de condução de uns poucos graus apenas; isto porque os diodos que acompanham o filtro com capacitor de entrada são ligados por um breve intervalo de tempo próximo ao pico, e são desligados durante o resto do ciclo.

22/70

Eletrônica Analógica

Ondulação

Supondo que a descarga do capacitor comece quando $t = T_1$. Então temos: Q

$$V^1$$

$$_1 = C$$

Se a descarga do capacitor terminar em $t = T_2$, então a tensão final será: Q

$$V^2$$

$$_2 = C$$

A ondulação de pico a pico é igual à diferença entre as tensões anteriores: Q Q

$$V - V^{12}$$

$$^{12} = C$$

Dividimos ambos os lados da equação pelo tempo de descarga:

$$\begin{aligned} V - V_1 &=) \\ ^2 Q Q - \\ T T - \\ - ^{12} \\ ^{21} C (T T ^{21} \end{aligned}$$

Quando a constante de tempo é maior do que o período da ondulação, o tempo de descarga $T_2 - T_1$ é aproximadamente igual a T , o período da ondulação será: $V_1 - V_2$

$$\begin{aligned} T Q Q C T \\ = \end{aligned}$$

Como a tensão da carga é praticamente constante, a corrente da carga é aproximadamente constante, a equação anterior se reduz a:

$$V_1 - V_2 = \frac{I_{cc}}{f C}$$

Fazendo-se $V_{ond} = V_1 - V_2$, a ondulação de pico a pico, e a frequência da ondulação é igual ao inverso do período T da ondulação, temos:

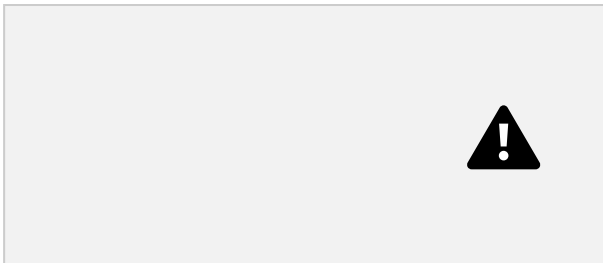
$$V_{ond} = \frac{I_{cc}}{f C}$$

onde: I_{cc} = corrente de carga cc
 C = capacitância

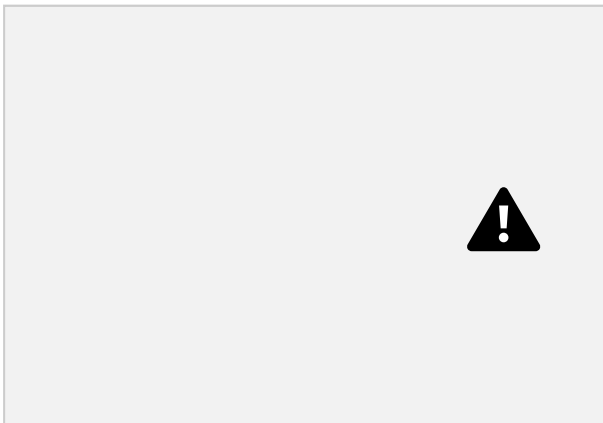
f = frequência da ondulação

VALOR DA TENSÃO CC COM A FILTRAGEM

Retificador de meia onda com filtro capacitivo



Retificador de onda completa ou em ponte com filtro capacitivo



23/70

Eletrônica Analógica

$\Delta V = V_{OND}$ (pico a pico) → ondulação de pico a pico na carga
 V_{MAX} → tensão de pico na carga

$$V_{MAX} - V_{CC} = \frac{\Delta V}{2} \Rightarrow \Delta V = 2(V_{MAX} - V_{CC}) \quad (1)$$

$$\Delta V = \frac{I_{cc}}{f C}$$

$$\Delta V = \frac{I_{cc}}{f C} \Rightarrow V_{CC} = \frac{I_{cc}}{f C} \Delta V \quad (2)$$

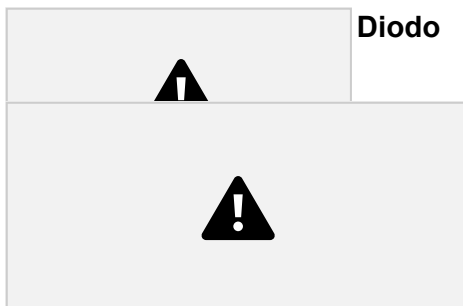
Substituindo ΔV por (1) em (2) temos:

$$V_{fRC} 2(V_{CC})_{CC} = V_{MAX} - V_{CC} \Rightarrow V_{CC} = V_{MAX} - V_{CC} \Rightarrow V_{CC} = \frac{V_{MAX}}{2} = \frac{V_{MAX}}{2} fRC$$

$$V_{CC} = \frac{V_{MAX}}{2} fRC \Rightarrow V_{CC} = \frac{V_{MAX}}{2} fRC \Rightarrow V_{CC} = \frac{V_{MAX}}{2} fRC$$

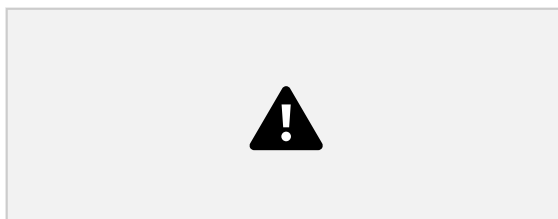
$$\frac{2 f R C V_{MAX}}{1 + 2 f R C} = V_{CC}$$

Onde $f \rightarrow$ frequência de ondulação (60Hz para retificador de meia onda e 120Hz para o retificador de onda completa ou em ponte).



$$PIV - V_{2(pico)} - V_{2(pico)} = 0$$

$$PIV = 2 V_{2(pico)}$$



$$PIV - V_{2(pico)} + 0 = 0$$

$$PIV = V_{2(pico)}$$

$$PIV + 0 - V_{2(pico)} = 0$$

$$PIV = V_{2(pico)}$$

Corrente de Surto (Impulsiva)

Antes da alimentação ser ligada, o capacitor do filtro está descarregado. No instante em que o circuito é energizado, o capacitor se parece com um curto; portanto, a corrente inicial de carga será muito grande. Esse fluxo rápido de corrente é chamado corrente de surto.

No pior caso, o circuito pode ser energizado no instante em que a tensão da linha está no

seu máximo. Isto significa que V_2 (pico) encontra-se no enrolamento secundário (retificador em ponte), e o capacitor está descarregado. A única coisa que impede a passagem da corrente é a resistência dos enrolamentos e a resistência de corpo dos diodos. Podemos simbolizar esta resistência como R_{TH} , a resistência Thevenin (que apresenta um valor baixo), olhando do capacitor para trás em direção ao retificador. Portanto, no pior caso:

$$V_{surto} (pico) = \sqrt{2} \cdot V_{TH}$$

Exemplo: Sendo a tensão do secundário igual a 12,6V ca e a resistência Thevenin voltada para o capacitor de 1,5Ω; V_2 (pico) = $2 \times 12,6V = 17,8V$, o que implica na corrente de surto máxima:

$$I_{surto} = \frac{17,8V}{1,5\Omega} = 11,9A$$

Essa corrente começa a diminuir tão logo o capacitor se carregue. Se o capacitor for extremamente grande, a corrente de surto poderá, entretanto, permanecer num nível alto por um instante e danificar o diodo.

A tensão do secundário tem um período de:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60Hz} = 16,7ms \quad \text{ou} \quad T = \frac{1}{f} = \frac{1}{120Hz} = 8,33ms$$

* Dois casos mais comuns.

Para uma resistência Thevenin de 1 Ω, um capacitor de 1.000μF produz uma constante de tempo de 1 ms. Isto quer dizer que o capacitor pode se carregar dentro de alguns milissegundos, uma fração de um ciclo. Isto geralmente não é suficiente para danificar o diodo.

Quando a capacitância for muito maior do que 1.000μF, a constante de tempo se torna muito grande, e pode levar vários ciclos para o capacitor se carregar completamente. Se a corrente de surto for muito alta, pode ocorrer facilmente um dano no diodo, como pode também haver um estrago no capacitor devido ao aquecimento e à formação de gás no eletrólito.

SUPERPOSIÇÃO

O Princípio da Superposição é utilizado em sistemas lineares que possuem mais de uma excitação de entrada.

Neste caso, o sistema é facilmente resolvido através da aplicação de cada entrada individualmente e anulando-se as entradas restantes.

A resposta é a soma das respostas obtidas para cada entrada individual.

CAPACITOR

Seja o circuito abaixo excitado por uma fonte de tensão constante de $v_1(t) = v_1$ volts para $t = 0$ e com o capacitor inicialmente carregado com tensão v_0 :

Pode-se resolvê-lo facilmente aplicando o teorema da superposição.

a) Anulando-se as condições iniciais e tendo como única excitação a fonte de tensão:

A equação diferencial do circuito obtida pela Lei de Kirchhoff das Malhas é:

$$v_1 = Ri(t) + v(t) = RC \frac{dv(t)}{dt} + v(t)$$

cuja solução para $v(t)$ é : $v(t) = v_1 (1 - e^{-t/RC})$; $t \geq 0$

RC

b) Agora, anulando-se a fonte de tensão, o circuito é representado da seguinte forma: Relembrando circuitos, uma fonte de tensão nula

equivale a um curto-circuito, pois a diferença de potencial entre dois terminais do mesmo é zero. Se a fonte fosse de corrente, o correto seria substituí-la por um circuito aberto, pois neste caso, a corrente deveria ser zero.

Pela Lei de Kirchhoff dos Nós: $i_1 + i_2 = 0$

$$R \frac{dv(t)}{dt} + v(t) = 0$$

R

Resolvendo esta equação diferencial a resposta obtida é:

$$v(t) = v_0 e^{-t/RC} \quad ; \quad t \geq 0$$

$$v(t) = v_1 (1 - e^{-t/RC}) + v_0 e^{-t/RC} \quad ; \quad t \geq 0$$

RC

Aplicando agora o Princípio da Superposição, tem-se como resposta final:

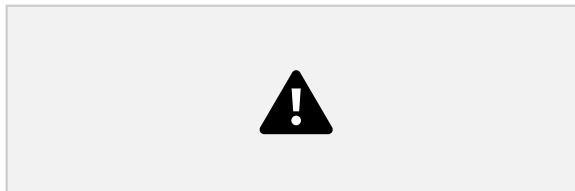
Resposta total = resposta excitada pela fonte de tensão com CI's nulas + resposta excitada pela CI com fonte de tensão nula

$$v(t) = v_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) + v_1 e^{-\frac{t}{RC}}; t \geq 0$$

MULTIPLICADORES DE TENSÃO

Um multiplicador de tensão é formado por dois ou mais retificadores de pico que produzem uma tensão cc igual a um múltiplo da tensão de pico da entrada ($2V_p$, $3V_p$, $4V_p$, assim por diante). Estas fontes de alimentação são usadas em dispositivos de alta tensão/baixa corrente como os tubos de raios catódicos (os tubos da imagem os receptores de TV, os osciloscópios, e as telas de computadores), cercas elétricas, ionizadores de ar, fontes de alta tensão e dispositivos para proteção.

Dobrador de Tensão de Meia Onda



A figura ao lado representa um dobrador de tensão. No pico do semiciclo negativo, D_1 está polarizado diretamente e D_2 está reversamente. Idealmente, isto faz com que C_1 se carregue até a tensão de pico V_p , com a polaridade: - —) | — + . No pico do semiciclo positivo, D_1 está com polarização

reversa e D_2 com direta. Pelo fato da fonte e C_1 estarem em série, C_2 tentará se carregar até $2V_p$. Depois de vários ciclos, a tensão através de C_2 será igual a $2V_p$.

Observa-se que C_2 descarrega-se através do resistor de carga R_L . Na medida em que R_L for suficientemente grande, a tensão de saída se torna igual a $2V_p$ (idealmente). Isto é, desde que a carga seja suave (constante de tempo grande), a tensão de saída é o dobro da tensão de pico da entrada. Esta tensão de entrada geralmente provém do enrolamento secundário de um transformador.

A especificação PIV dos diodos precisa ser maior do que $2V_p$.

Para um dado transformador, você pode obter duas vezes mais tensão de saída do que se consegue de um retificador de pico padrão. Isto é útil quando se está tentando produzir altas tensões (algumas centenas de volts ou mais). Visto que tensões mais altas no secundário implicam transformadores maiores, em alguns casos, é preferível utilizar dobradores de tensão em vez de transformadores maiores.

O circuito é chamado dobrador de meia onda porque o capacitor de saída C_2 se carrega somente uma vez durante cada ciclo. Como resultado, a frequência da ondulação é de 60 Hz. Às vezes você pode ver um resistor de surto em série com C_1 .

Dobrador de Tensão de Onda Completa



A figura ao lado mostra um dobrador de tensão de onda completa. No semiciclo positivo da fonte, o capacitor de cima (C_1) se carrega até a tensão de pico com a polaridade mostrada. No semiciclo seguinte, o capacitor de baixo (C_2) se carrega até a tensão de pico com a polaridade indicada. Para uma carga suave, a tensão final de saída é de aproximadamente $2V_P$.

O circuito é chamado dobrador de tensão de onda completa porque um dos capacitores de saída está sendo carregado durante cada meio ciclo. Colocando de outra forma, a ondulação de saída é de 120 Hz. Esta frequência de ondulação constitui uma vantagem porque é mais fácil de ser filtrada.

A especificação PIV dos diodos precisa ser maior do que $2V_P$.

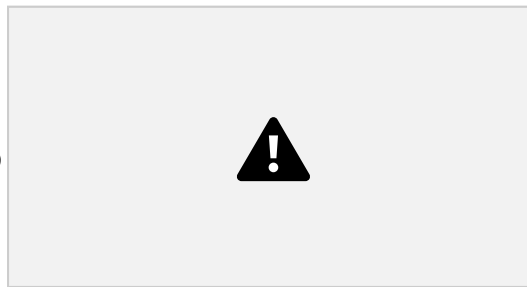
A desvantagem de um dobrador de onda completa é a falta de terra comum entre a saída e a entrada. Em outras palavras, se aterrarmos a extremidade inferior do resistor de carga no dobrador de tensão de onda completa, a fonte fica flutuando. No dobrador de meia onda, aterrando o resistor de carga estaremos aterrando também a fonte, uma vantagem em algumas aplicações.

27/70

Eletrônica Analógica

Triplicador de Tensão

Ligando-se outra seção, obteremos o triplicador de tensão da figura ao lado. Os dois primeiros retificadores de pico funcionam como um dobrador. No pico do semiciclo negativo, D_3 está polarizado diretamente. Isto carrega C_3 até $2V_P$ com a polaridade mostrada na figura. A saída do triplicador aparece através de C_1 e C_3 .



A resistência de carga é ligada através da saída do triplicador. Desde que a constante de tempo seja grande, a saída é de aproximadamente $3V_P$.

A especificação PIV dos diodos precisa ser maior do que $2V_P$.

Quadruplicador de Tensão

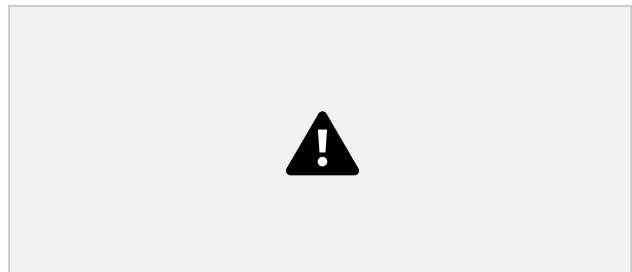
A figura ao lado representa um quadruplicador de tensão, quatro retificadores de pico em cascata (um depois do outro). Os três primeiros formam um triplicador, e o quarto completa o circuito do quadruplicador.

Conforme

aparece na figura, o primeiro capacitor carrega até V_P ; todos os outros carregam até $2V_P$. A saída do quadruplicador é pela ligação de C_2 e C_4 em série.

Como de costume, é necessária uma grande resistência de carga (constante de tempo grande) para se ter uma saída aproximada de $4V_P$.

A especificação PIV dos diodos precisa ser maior do que $2V_P$.



✓ Teoricamente, podemos somar seções indefinidamente; entretanto, a ondulação fica pior à medida que acrescentamos seções adicionais. Esta é a razão dos multiplicadores de tensão não serem usados em fontes de baixa tensão, que constituem a maioria das fontes de alimentação encontradas. Conforme ficou estabelecido anteriormente, os multiplicadores de tensão quase sempre são usados para produzir altas tensões, bem na faixa de centenas ou milhares de volts.

O LIMITADOR

Os diodos usados em fontes de alimentação são diodos retificadores, aqueles com uma especificação de potência maior do que 0,5 W e otimizados para utilização em 60 Hz. Nos circuitos analisados adiante, estaremos utilizando diodos de pequeno sinal; aqueles que possuem especificação de potência de menos de 0,5 W (com corrente de miliampères em vez de ampères) e são usados especificamente em frequências muito maiores do que 60 Hz.

O primeiro circuito de pequeno sinal a ser discutido é o limitador de tensão, seletor de amplitude ou ceifador; ele é usado na transmissão de sinais para separar a parte de uma forma de onda qualquer que está acima ou abaixo de um certo nível de referência. Isto é útil não só para variar a forma do sinal, mas também para proteger os circuitos que recebem o sinal.

Limitador Positivo



A figura ao lado mostra um limitador positivo (às vezes chamado ceifador), um circuito que retira partes positivas do sinal. Conforme a figura, a tensão de saída tem todos os semiciclos positivos cortados. O circuito funciona da seguinte maneira: durante a metade positiva da tensão de

entrada, o diodo liga. Idealmente, a tensão de saída é zero; numa segunda aproximação é de aproximadamente +0,7 V.

Durante a metade negativa do ciclo, o diodo está polarizado reversamente. Em muitos limitadores, o resistor de carga R_L é de pelo menos 100 vezes maior do que o resistor R em série. Por esta razão, a fonte é estável e o semiciclo negativo aparece na saída.

Na forma de onda na saída, a metade positiva do ciclo foi eliminada. O corte não é perfeito. Numa segunda aproximação, um diodo de silício conduzindo produz uma queda de aproximadamente 0,7 V. Pelo fato do primeiro 0,7 V ser usado para ultrapassar a barreira de potencial, o sinal de saída é cortado perto de +0,7 V e não em zero.

✓ Se você reverter a polaridade do diodo, obterá um limitador negativo que retira o semiciclo negativo. Neste caso, o nível de corte é próximo de -0,7 V.

Limitador Polarizado



Com o limitador polarizado da figura ao lado, você pode deslocar o nível de corte para $V + 0,7$. Quando a tensão de entrada for maior do que $V + 0,7$, o diodo conduzirá e a saída será mantida em $V + 0,7$. Quando a tensão de entrada for menor do que $V + 0,7$, o

diodo abrirá e o circuito se transformará num divisor de tensão. Como anteriormente, a resistência de carga deve ser muito maior do que a resistência em série; então a fonte é estabilizada e toda a tensão de entrada chega na saída.

Associação de Limitadores



Você pode combinar limitadores com polarização positiva e negativa como mostra a figura ao lado.

O diodo D_1 liga quando a tensão de entrada excede

$V_1 + 0,7$; este é o nível positivo de supressão. Analogamente, o diodo D_2 conduz quando a entrada é mais negativa do que $-V_2 - 0,7$; este é o nível negativo de supressão. Quando o sinal de entrada for grande, isto é, quando V_P for muito maior do que os níveis de supressão, o sinal de saída se assemelhará a uma onda quadrada como a da figura acima.

BATERIAS X DIODOS

O uso de baterias para se ajustar o nível de ceifamento é impraticável. Uma aproximação consiste em se acrescentar mais diodos de silício, porque cada um produz uma compensação de 0,7V. Por exemplo se utilizarmos dois diodos num limitador positivo, como cada diodo tem uma compensação de cerca de 0,7V, o par de diodos produz um nível de supressão de

aproximadamente +1,4V. Para quatro diodos, resulta num nível de supressão de aproximadamente +2,8V. Não há limite quanto ao número de diodos usados, e isto é prático, pois os diodos são baratos.

O GRAMPEADOR CC

O grampeador cc soma uma tensão cc ao sinal. Por exemplo, se o sinal que chega oscila (varia) de -10 V a +10 V, um grampeador cc positivo produziria uma saída que idealmente oscila de 0 a +20 V. (Um grampeador cc negativo produziria uma saída entre 0 e -20 V.)

Grampeador Positivo



A figura ao lado mostra um grampeador cc positivo. Idealmente o seu funcionamento é assim: No primeiro semiciclo negativo de tensão de entrada, o diodo conduz. No pico negativo, o capacitor se carrega até V_p com a

polaridade indicada.

Um pouco depois do pico negativo, o diodo desliga. A constante de tempo $R_L C$ é feita deliberadamente muito maior do que o período T do sinal que entra. Por esta razão, o capacitor permanece quase que completamente carregado durante o tempo em que o diodo fica desligado. Numa primeira aproximação, o capacitor funciona como uma bateria de volts. Esta é a razão da

tensão de saída acima ser um sinal grampeado positivamente.



A figura abaixo mostra o circuito como é desenhado normalmente. Como o diodo produz uma queda de 0,7 V ao conduzir, a tensão do capacitor praticamente não chega a V_p . Por esta razão, o grampeador cc não é perfeito e os picos negativos ocorrem em -0,7 V.

Grampeador Negativo

Se invertermos o diodo na figura acima a polaridade da tensão do capacitor se inverte, e o circuito torna-se um grampeador negativo. Tanto o grampeador positivo como o negativo são amplamente usados. Os receptores de TV, por exemplo, utilizam um grampeador cc para somar uma tensão cc ao sinal de vídeo. Na especialidade televisão, o grampeador cc é geralmente chamado restaurador cc.



Se você colocar em cascata um grampeador cc e um detector de pico (o mesmo que um retificador de pico), obterá um detector de pico a pico (veja a figura ao lado). A senóide de entrada é grampeada

positivamente, portanto a entrada do detector de pico tem um valor de pico de $2V_p$. Esta é a razão da saída do detector de pico ser uma tensão cc igual a $2V_p$.

Como de costume, a constante de tempo de descarga $R_L C$ deve ser muito maior do que o período do sinal de entrada. Satisfazendo essa condição, você tem bom desempenho do grampeador e boa detecção do pico. A ondulação de saída será, portanto, pequena.

Quando a saída de um detector de pico a pico é aplicada a um voltímetro cc, a associação funciona como um voltímetro ca de pico a pico. Supondo que o sinal oscile entre -20 V e +50 V. Se você tentar medir esses valores com um voltímetro ca comum, terá uma leitura incorreta. Se usar um detector de pico a pico à frente de um voltímetro cc, lerá 70 V para o valor de pico a pico do sinal.

FONTE DE TENSÃO ESTABILIZADA



Projeto do Regulador R-Z



Pela característica do Zener

apresentada, notamos que ao operarmos com o dispositivo na região de avalanche controlada, para grandes variações de corrente, a tensão permanece constante.

Quando o Zener está trabalhando na região de avalanche controlada, V_Z pode ser considerada constante. Ao ocorrer variação de corrente na carga R_L ou na tensão de entrada, dentro de certos limites, o Zener deverá compensar tais variações.

Temos: $I = I_Z + I_L$. Para I constante: Se I_L aumentar I_Z diminuirá

Se I_L diminuir I_Z aumentará

Como vimos, para uma boa margem de variação de I_Z , V_Z permanecerá constante.

Tensão que alimenta o diodo Zener:

Retiramos o diodo Zener do circuito, o divisor de tensão será formado por R e R_L .

Teremos uma tensão Thevenin:

$$V_{TH} = V_{IN} \frac{R_L}{R + R_L}$$

=.Para funcionamento na região de ruptura do Zener, V_{TH} deve ser maior V_Z .

$$V_{TH} = V_{IN} \frac{R_L}{R + R_L}$$

$$I_{IN} = \frac{V_{IN} - V_Z}{R + R_L}$$

$$\text{Corrente (I): } I_{IN} = \frac{V_{IN} - V_Z}{R + R_L}$$

Ondulação pelo Resistor de Carga

$$I_{IN(max)} = \frac{V_{IN(max)} - V_Z}{R + R_L}$$

$$I_{IN(min)} = \frac{V_{IN(min)} - V_Z}{R + R_L}$$

$$V_{OUT} = V_Z + I_{IN} R_L$$

Subtraindo as duas equações:

$$R_L \Delta I_{IN} = \Delta V_{OUT} - \Delta V_Z$$

$$\Delta V_{OUT} \approx \Delta V_Z + R_L \Delta I_{IN}$$

Que pode ser escrita na forma:

Logo, a ondulação de pico a pico na entrada é igual à variação da corrente em série vezes a resistência em série.

Como: $\Delta V_Z \approx \Delta I_{IN} r_Z$ é a resistência intrínseca do Zener.

A razão entre a ondulação de saída e a ondulação de entrada será:

$$\frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta V_{IN}} \approx 1 + \frac{R_L}{r_Z}$$

$$\frac{\Delta V_Z}{I_Z} = \frac{\Delta I_Z r_Z}{I_Z} + \Delta I_Z R$$

Para uma resistência de carga constante, a variação na corrente Zener é igual à variação na corrente da fonte, e assim a relação se reduz a:

$$\frac{\Delta V_Z}{I_Z} = \frac{\Delta V_{IN}}{I_{IN}} R$$

32/70

Eletrônica Analógica

Cálculo de R

R Máximo: Para que o regulador Zener mantenha a tensão constante, o diodo Zener deve permanecer na região de ruptura em todas as condições de funcionamento; isto significa que deve haver uma corrente Zener para todas as tensões da fonte e todas as correntes de cargas. O pior caso ocorre com tensão mínima da fonte e corrente máxima da carga porque a corrente Zener cai para um mínimo. Neste caso:

$$I_{IN} = \frac{V_{IN(min)} - V_Z}{R} = I_{Z(min)} + I_{L(max)}$$

Como: $I = I_Z + I_L$, no pior caso temos: $I_{(min)} = I_{Z(min)} + I_{L(max)}$

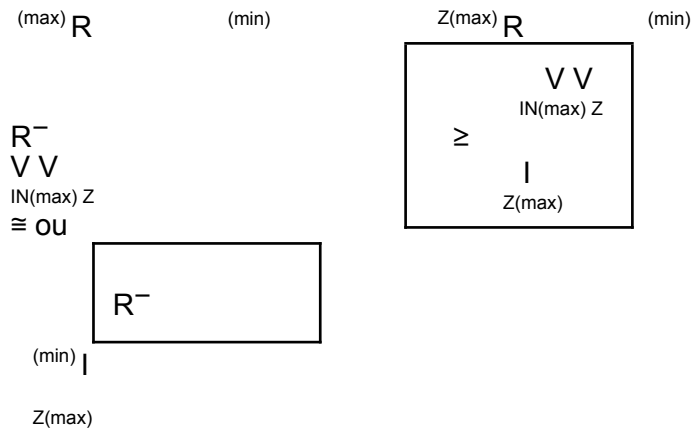
Neste ponto a corrente Zener cai ao mínimo e a regulação será perdida para valores de I_Z menores que $I_{Z(min)}$ (Zener deixa de funcionar).

Substituindo $I_{(min)}$ por $I_{Z(min)} + I_{L(max)}$ em (*) temos:

$$R = \frac{V_{IN(min)} - V_Z}{I_{Z(min)} + I_{L(max)}} \leq \frac{V_{IN(max)} - V_Z}{I_{Z(max)}}$$

R Mínimo: Tensão máxima na entrada e $R_L = \infty$ (sem carga), temos que toda a corrente passa pelo Zener.

$$I_{IN} = \frac{V_{IN(max)} - V_Z}{R} = I_{Z(max)}$$



- Teremos um regulador Zener quase ideal se satisfazermos estas condições:

$1. r_Z \leq 0,01R$
$2. \frac{V_Z}{0,01R_L} \leq r$

Na primeira condição reduzimos as variações da tensão da fonte, incluindo a ondulação, de um fator de pelo menos 100.

Na segunda condição o regulador Zener apresenta-se para a carga como se fosse uma fonte de tensão quase ideal.

TRANSISTOR

Formação dos Elementos NPN E PNP



A figura ao lado mostra cristais npn e pnp. O emissor é densamente dopado; sua função é de emitir, ou injetar elétrons na base. A base é levemente dopada e muito fina, de modo a evitar a recombinação dos pares elétron-lacuna; ela permite que a maioria dos elétrons

injetados pelo emissor passe para o coletor. O nível de dopagem do coletor é intermediário entre a dopagem densa do emissor e a dopagem fraca da base. O coletor é assim chamado porque ele coleta ou junta os elétrons que vêm da base. O coletor é a região mais extensa das três, ele deve dissipar mais calor que a base ou o emissor.

Junção Emissor-Base e Coletor-Base

O transistor da figura acima tem duas junções, uma entre o emissor e a base, e outra entre a base e o coletor. Por causa disso, um transistor se assemelha a dois diodos. Chamamos o diodo da esquerda de diodo emissor-base ou simplesmente diodo emissor. O diodo da direita é o

diodo coletor-base ou diodo coletor.

O transistor pnp é o complemento do transistor npn; os portadores majoritários do emissor são as lacunas em vez dos elétrons livres. Isto quer dizer que são envolvidas correntes e tensões opostas no funcionamento de um transistor pnp. Nos estudos posteriores, utilizaremos transistor npn, a menos que seja indicado o contrário.

O Transistor



Tal qual no estudo dos diodos, existirá em cada junção do transistor uma barreira de potencial devido à formação da camada de depleção.

Pelo fato das três regiões terem diferentes níveis de dopagem, as camadas de depleção não possuem a mesma largura. Quanto mais densamente dopada uma região, maior a concentração de íons próxima da junção. Isto significa que a camada de depleção só penetra ligeiramente na região do emissor (densamente dopada), porém profundamente na base (levemente dopada). A outra camada de depleção estende-se bem para dentro da base e penetra na região do coletor numa quantidade menor. A camada de depleção do emissor é pequena e a do coletor é grande.

Os transistores de silício proporcionam especificações de tensão mais alta, maior especificação de corrente e menor sensibilidade à temperatura, sendo mais amplamente utilizados.

POLARIZAÇÃO DO TRANSISTOR

Junções com Polarização Direta



Na figura ao lado a bateria da esquerda polariza diretamente o diodo emissor, e a bateria da direita diretamente o diodo coletor. Os elétrons livres (portadores majoritários) entram no emissor e

no coletor do transistor, juntam-se na base e fluem através do fio comum como mostra a figura. Como os dois diodos estão polarizados diretamente, as correntes do emissor e do coletor são grandes.

34/70

Eletrônica Analógica

Junções com polarização Reversa



A figura ao lado, mostra uma outra forma de se polarizar o transistor. Agora os dois diodos estão reversamente polarizados. Para essa

condição, o fluxo é pequeno, consistindo apenas de

dois tipos de portadores minoritários: os produzidos termicamente e por fuga superficial. O componente produzido termicamente depende da temperatura; ele tem seu valor aproximadamente dobrado a cada 10°C de acréscimo na temperatura ambiente. O componente de fuga superficial, por outro lado, aumenta com a tensão. Essas correntes reversas geralmente são desprezíveis.

✓ Em ambos os casos, nada de incomum acontece. Ou temos uma corrente considerável (quando os dois diodos estão polarizados diretamente) ou praticamente nenhuma corrente (quando os dois diodos estão polarizados reversamente). Os transistores raramente

estão polarizados dessa forma nos circuitos lineares.

Junções com Polarização DIRETA, REVERSA



Com a polarização direta aplicada ao diodo emissor, se V_{BE} for maior do que o potencial da barreira (0,6 a 0,7 V para os transistores de

silício), muitos elétrons do emissor penetraram na região da base. A região de base deverá ser a mais estreita possível, de modo a diminuir a possível recombinação dos pares elétron-lacuna. As lacunas que se recombinarem com os elétrons, serão fornecidas pela corrente da base. Ela é pequena porque a base é pouco dopada contendo somente umas poucas lacunas. Como a junção Coletor-Base possui polarização inversa, os elétrons injetados na região da Base provenientes do Emissor são atraídos para o Coletor, devido à tensão elevada presente nos terminais do coletor.



Uma segunda idéia importante no funcionamento do transistor é que a base é muito fina. Estando a base repleta de elétrons injetados da banda de condução, produzindo a difusão para dentro da camada de depleção do coletor. Uma vez dentro dessa camada, os elétrons livres são empurrados pelo campo da camada de depleção para dentro da região do coletor. Esses elétrons do coletor podem então fluir pelo terminal externo do coletor.

Na maioria dos transistores, mais de 95 por cento dos elétrons injetados pelo emissor fluem para o coletor; menos de 5 por cento preenchem as lacunas da base e fluem para fora através do terminal externo da base.

EQUAÇÕES: SIMBOLOGIA:

$$I_E = I_C + I_B$$

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$



Potência dissipada por um transistor é dada por: $P_D = V_{CE} \times I_C$.

35/70

Eletrônica Analógica

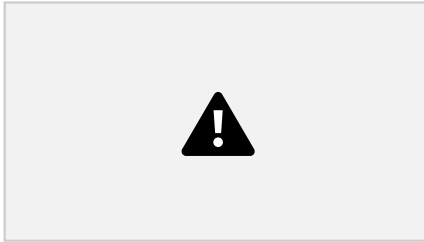
Tensões de Ruptura

Como as duas metades de um transistor são diodos, tensão reversa em demasia em qualquer diodo pode causar uma ruptura. Essa tensão de ruptura depende da largura da camada de depleção e dos níveis de dopagem. Por ter um alto nível de dopagem, o diodo emissor tem uma tensão de ruptura BV_{BE} baixa, aproximadamente 5 a 30 V. O diodo coletor, por outro lado, é menos densamente dopado. Portanto a sua tensão de ruptura BV_{CB} é mais alta, aproximadamente de 20 a 300 V.

Para o funcionamento normal do transistor, o diodo coletor é polarizado reversamente. Quando V_{CB} é grande demais, o diodo coletor interrompe-se e pode ser danificado por dissipação excessiva de potência. Em muitos projetos, entretanto, precisamos manter a tensão do coletor abaixo da especificação máxima para BV_{CE} dada na folha de dados do fabricante. Da mesma forma, em alguns circuitos com transistores o diodo emissor pode ser temporariamente polarizado

reversamente; em nenhum momento a tensão reversa deve exceder a especificação máxima para BV_{BE} .

Resistência do Espalhamento da Base



Por apresentar duas camadas de depleção penetrando na base, as lacunas da base estão confinadas ao fino canal de semiconductor tipo p. A resistência desse canal fino é chamada de resistência de espalhamento da base r'_b . Aumentando-se V_{CB} a polarização reversa do diodo coletor diminui a largura do canal p, o que equivale a um aumento em r'_b .

A corrente de recombinação na base deve fluir para baixo através de r'_b . Quando o faz produz uma diferença de potencial (ddp) que depende da largura do canal p, bem como da dopagem da base. Em casos raros, r'_b chega a valores tão elevados quanto 1000 Ω . Tipicamente, situa-se na faixa de 50 a 150 Ω . Os efeitos de r'_b , são importantes em circuitos de alta frequência. Em frequências baixas, r'_b geralmente tem efeito pequeno, sendo portanto desprezado.

Alfa CC (α_{cc})

O alfa CC de um transistor indica o quanto a corrente do coletor se aproxima da corrente do emissor. $\alpha =$

$$\alpha_{cc} = \frac{I_C}{I_E}$$

Beta CC (β_{cc})

Relacionamos a corrente do coletor, com a corrente do emissor através do alfa cc. Podemos relacionar também a corrente do coletor com a corrente da base definindo-se o beta cc de um transistor da seguinte forma:

$$\beta_{cc} = \frac{I_C}{I_B}$$

Para quase todos os transistores, menos de 5 por cento dos elétrons injetados pelo emissor recombina-se com as lacunas da base para produzir I_B ; portanto β_{cc} é quase sempre maior que 20. Geralmente, ele se encontra entre 50 e 300. E alguns transistores têm um beta cc da ordem de 1000.

Num outro sistema de análise, chamado parâmetros h, usa-se h_{FE} em vez de beta cc para o ganho da corrente cc.

$$\beta_{cc} = h_{FE}$$

As folhas de dados utilizam o símbolo h_{FE} para indicar o ganho da corrente cc. Por exemplo, a folha de dados de um 2N3904 dá um valor mínimo de h_{FE} de 100 e um h_{FE} máximo de 300. Isto quer dizer que varia de 100 a 300.

Relação entre β_{cc} e α_{cc}

Pela lei de Kirchhoff para a corrente temos:

$$I_E = I_C + I_B$$

Dividindo ambos os lados da equação acima por I_C temos:

$$I_E = I_C + I_B \Rightarrow I_E = I_C (1 + \beta_{CC})$$

Usando um pouco de álgebra, podemos reorganizar os termos para obter:

$$\alpha_{CC} = \frac{\beta_{CC}}{1 + \beta_{CC}}$$

Ocasionalmente precisamos de uma fórmula para α_{CC} em termos de β_{CC} . Através da álgebra podemos reorganizar os termos da equação acima para obter:

$$\alpha_{CC} = \frac{\beta_{CC}}{1 + \beta_{CC}}$$

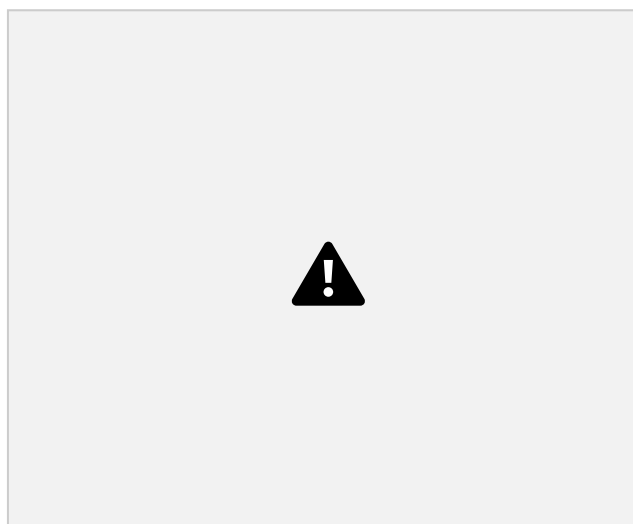
Região Ativa do Transistor

Condições necessárias para um transistor funcionar num circuito linear:

1. O diodo emissor deve estar polarizado diretamente.
2. O diodo coletor deve estar polarizado reversamente.
3. A tensão através do diodo coletor deve ser menor do que a tensão de ruptura.

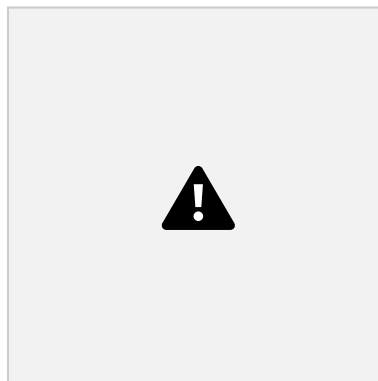
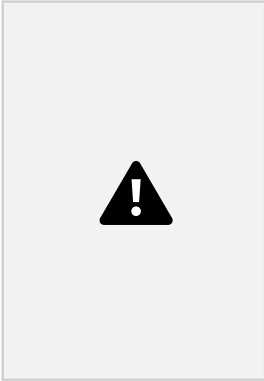
✓ Quando estas condições são satisfeitas, o transistor é um componente ativo porque ele é capaz de amplificar um sinal de entrada para produzir um sinal de saída maior.

▪ Na realidade β_{CC} não é constante na região ativa, ele varia com a temperatura ambiente e mesmo com I_C . A variação de β_{CC} pode ser da ordem de 3:1 ao longo da região ativa do transistor. A figura abaixo mostra um exemplo de variação de β_{CC} .



TRANSISTOR - CONFIGURAÇÕES BÁSICAS

Configuração Base-Comum



A terminologia base comum deriva do fato da base ser comum tanto à entrada quanto à saída da configuração. Além disso, a base é normalmente o terminal aterrado ou com um nível de potencial mais próximo ao terra.

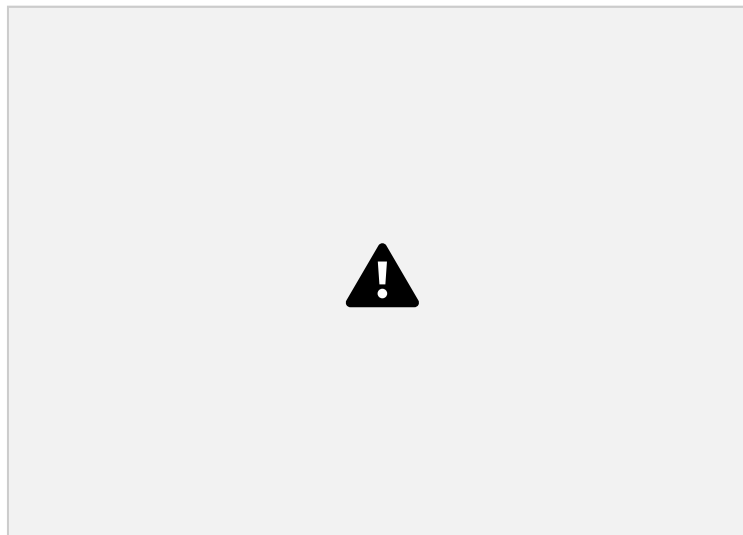
Para descrever totalmente o comportamento de um dispositivo de três terminais, como os amplificadores em base comum da figura ao lado, são exigidos dois conjuntos de curvas características – um para o ponto de excitação, ou parâmetros de entrada, e o outro para a saída. O conjunto de entrada para o amplificador em base-comum, mostrado na figura ao lado direito, relacionará uma corrente de entrada (I_E) e uma tensão de entrada (V_{BE}) para vários níveis de tensão de saída (V_{CB}).

O conjunto de saída relacionará uma corrente de saída (I_C) a uma tensão de saída (V_{CB}) para vários níveis de corrente de entrada (I_E), como mostra a figura ao lado. O conjunto de curvas características de saída ou de coletor tem três regiões de interesse indicadas:

ativa, corte e saturação. A região ativa é aquela normalmente empregada para amplificadores lineares (não distorcidos).

Na **região ativa**, a junção coletor-base está reversamente polarizada, enquanto que a junção base emissor está diretamente polarizada.

A região ativa é definida pelos esquemas de polarização. No extremo inferior da região ativa, a corrente de emissor (I_E) é zero, a corrente de coletor é devido exclusivamente à corrente de saturação reversa I_{CO} . Os valores de corrente I_{CO} é tão pequeno (microamperes) comparado à



escala vertical de I_C (miliampéres), que ela localiza-se virtualmente na mesma linha horizontal de $I_C = 0$.

Observe que à medida que a corrente de emissor aumenta a partir de zero, a corrente de coletor aumenta até um valor essencialmente igual àquele da corrente de emissor, determinada pelas relações básicas de corrente no transistor. Note ainda o efeito quase que desprezível de V_{CB} sobre a corrente de coletor para a região ativa. As curvas indicam claramente uma primeira aproximação para a relação entre I_E e I_C na região ativa é dada por:

$$I_E \cong I_C$$

A **região de corte** é definida como a região onde a corrente de coletor é 0 A. Além disso:

Na região de corte, as junções coletor-base e base-emissor de um transistor estão reversamente polarizadas.

A **região de saturação** é definida como aquela que se situa à esquerda de $V_{CB} = 0$ V. A escala horizontal foi expandida para mostrar as diferenças marcantes desta região. Observe o aumento exponencial da corrente de coletor à medida que a tensão V_{CB} aumenta em direção a 0V.

Na região de saturação, as junções coletor-base e base-emissor estão diretamente polarizadas.

38/70

Eletrônica Analógica



As condições de circuito que existem quando $I_E = 0$ para a configuração base-comum estão mostradas na figura ao lado. A notação utilizada mais freqüentemente para I_{CO} em folhas de especificação e de dados é, como indicado na figura ao lado, I_{CBO} . Devido a técnicas de fabricação

avançadas, o valor de I_{CBO} para transistores de propósito geral (sobretudo de silício) na faixa de baixa e média potência é normalmente tão pequeno que o seu efeito pode ser ignorado. Entretanto, para níveis de potência maiores, I_{CBO} ainda se situará na faixa de microamperes. Além disso, saiba que I_{CBO} , assim como I_S , para o diodo (ambas correntes de fuga reversas), é sensível à temperatura. Em temperaturas mais elevadas, o efeito de I_{CBO} pode tornar-se um importante fator, uma vez que este aumenta rapidamente com a temperatura.

As curvas características de entrada revelam que para valores fixos de tensão coletor (V_{CB}), a corrente de emissor aumenta quando a tensão base-emissor aumenta, comportamento que se assemelha às características do diodo. Na verdade, valores crescentes de V_{CB} têm efeito tão pequeno que para uma primeira aproximação consideram-se desprezíveis as modificações - introduzidas pela variação de V_{CB} . Para análise dc de circuitos com transistor, ou seja, estando o transistor no estado "ligado", a tensão base emissor a ser adotada será a seguinte: $V_{BE} = 0,7$ V

Para qualquer configuração de transistor no modo dc, pode-se agora afirmar imediatamente que a tensão da base para o emissor é de 0,7 V, se o dispositivo estiver na região ativa.

Configuração Emissor Comum

A configuração mais freqüente utilizada para o transistor aparece na figura ao lado. É denominada configuração emissor-comum, uma vez que o emissor é comum em referência aos terminais de entrada e saída (neste caso, comum aos terminais de coletor e base). Dois conjuntos de curvas características são novamente necessários para descreverem totalmente o comportamento da configuração emissor comum:



um para o
circuito de entrada ou base-emissor e um
para o circuito de saída ou coletor-emissor.
Ambos são mostrados nas figuras a seguir.

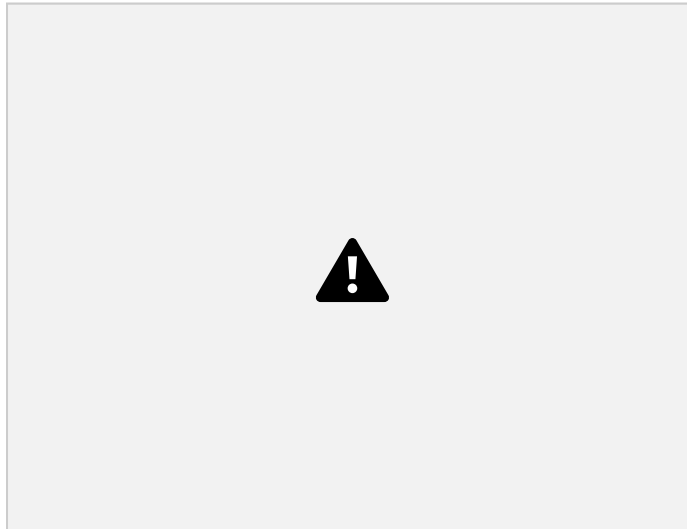
A **região ativa** para a configuração emissor-comum é a porção do quadrante superior direito que apresenta a maior linearidade, isto é, a região na qual as curvas de I_B são mais ou menos retas e estão igualmente espaçadas.

Na região ativa de um amplificador em emissor-comum, a junção coletor-base está reversamente polarizada, enquanto que a junção base-emissor está diretamente polarizada.

A região ativa da configuração emissor-comum pode ser empregada para a amplificação de tensão, corrente ou potência.

A **região de corte** da configuração emissor-comum não é definida da mesma maneira estabelecida para a configuração base-comum. Note nas características do coletor que I_C não é igual a zero quando I_B é zero.

Como o valor de I_{CEO} é tipicamente baixo para transistores de silício, o corte em termos de chaveamento ocorrerá quando $I_B = 0 \mu A$ ou $I_C = I_{CEO}$.



Linha de Carga CC

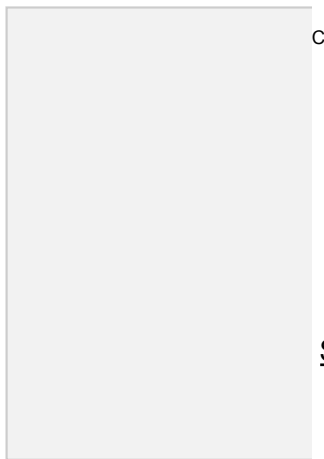
Equação da linha de carga

CC: I^-

$$= \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$

$^c R$





Saturação: $V_{CE} = 0 \Rightarrow I = \frac{V_{CC}}{R_C}$

Corte: $V_{CE} = V_{CC}$

A interseção da linha de carga com a corrente de base calculada é o ponto Q do transistor, ponto de operação ou ponto quiescente.

A linha de carga cc nos mostra qual a faixa da tensão ativa V_{CE} (compliance) de um transistor. Na figura acima o transistor tem uma compliance de aproximadamente 0 até V_{CC} . O transistor funciona como uma fonte de corrente em qualquer ponto ao longo da linha de carga cc, excluindo a saturação e o corte, onde se perde a ação de fonte de corrente.

O TRANSISTOR COMO CHAVE

O transistor funciona como chave quando operamos ou na saturação ou no corte. Quando o transistor está saturado é como se houvesse uma chave fechada do coletor para o emissor. Quando o transistor está no corte, é como se fosse uma chave aberta. O circuito é mostrado na figura acima.

Equações:

$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE}$. Na Saturação temos que $V_{CE} = 0$. Logo: $I_{C(sat)} = \frac{V_{CC}}{R_C}$

$V_{BE} \approx 0,7V$

$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$

I_B

Para o Transistor estar saturado temos: $I_C \geq \beta I_B$

I_C

I_B

$$I_B \leq I_{B(sat)}$$

Garantindo a Saturação Forte: $I_B \geq 10 I_{B(sat)}$

Para Transistor estar no corte: $V_{BB} = 0$

O TRANSISTOR COMO FONTE DE CORRENTE



Somando-se as tensões na malha de saída temos:

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE} + I_E R_E$$

Como a corrente do coletor é praticamente igual à corrente do emissor,

$$I_C \approx I_E$$

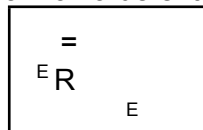
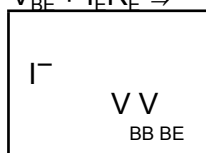
$$V_{CC} \approx I_E R_C + V_{CE} + I_E R_E$$

✓ Este circuito deve funcionar na região ativa em algum ponto Q ao longo da linha de carga.

Corrente do emissor:

Somando-se as tensões na malha de entrada temos:

$$V_{BB} = V_{BE} + I_E R_E \Rightarrow$$



Como a corrente de coletor é aproximadamente igual a este valor $\Rightarrow I_C \approx I_E$ ✓ O valor da corrente de coletor não depende de β_{CC} e a corrente de emissor é fixa.

Conceito de Amarramento (Bootstrap)

Em um transistor como fonte de corrente o emissor está amarrado à tensão de entrada, pois o transistor está sempre dentro de 0,7 V (V_{BE}) da tensão de entrada (V_{BB}). Se a tensão de entrada variar, esta variação será seguida pela tensão do emissor (V_E). Esta ação de seguir o líder é chamada de amarramento.

O MODELO DE EBERS-MOLL

Na análise ou projeto de um circuito transistorizado, tem-se dificuldade em trabalhar com o transistor a nível de malhas. Uma opção é a de se criar um circuito equivalente para o transistor usando componentes mais simples como fonte ou resistor.

O modelo de Ebers-Moll é um circuito equivalente do transistor levando em consideração que ele esteja trabalhando na região ativa, ou seja: o diodo emissor deve estar polarizado diretamente; o diodo coletor deve estar polarizado reversamente e a tensão do diodo coletor deve ser menor do que a tensão de ruptura.

O modelo faz algumas simplificações:

1. $V_{BE} = 0,7V$
2. $I_C = I_E \rightarrow I_B = I_E / \beta_{CC}$
3. Despreza a diferença de potencial produzida pela corrente de base ao atravessar a resistência de espalhamento da base.



41/70

Eletrônica Analógica

PARÂMETROS H

Os parâmetros híbridos (h) constituem uma aproximação matemática avançada para análise de circuitos com transistores lineares. São uma moderna ferramenta para a determinação exata do ganho de tensão, da impedância de entrada e da impedância de saída de um amplificador a transistor. A utilização dos parâmetros h requer cálculos que consomem muito tempo, logo deve ser utilizado em projetos que exigem a resposta mais precisa possível e quando temos acesso a um computador.

Sistemas de Quatro Parâmetros



$$v_1 = h_{11} i_1 + h_{12} v_2$$

$$i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} v_2$$

Os coeficientes nestas equações são chamados de parâmetros híbridos. Este sistema de análise tem sido usado para analisar amplificadores EC, CC e BC operando em baixas frequências.

- Supondo que haja um curto ca através dos terminais de saída, então $v_2 = 0$:

$$v_1 = h_{11} i_1 \quad i_2 = h_{21} i_1$$

v
1

$h_{11} =$ - Impedância de Entrada com a saída em curto h

i
(saída 1 em curto)

h i 2

h_{21} = - Ganho de corrente com saída em curto
 i_1 em curto)
 (saída 1

- Supondo que os terminais de entrada estejam abertos, então $i_1 = 0$

$$v_1 = h_{12} v_2 \quad i_2 = h_{22} v_2$$

$$h_{12} \quad v_1$$

h_{12} = - Ganho de tensão reverso com a entrada aberta
 v_1 aberta)
 (entrada 2

$$h_{21} \quad i_2$$

h_{22} = - Admitância de saída com a entrada aberta
 v_1 aberta)
 (entrada 2

✓ Como é extremamente fácil fazer um curto ca através da saída de um amplificador a transistor ou fazer um aberto ca na entrada, os fabricantes geralmente medem e especificam as características de pequeno sinal de um transistor com parâmetros h.

Exemplo: Transistor 2N3904 em ligação EC com 1 mA de corrente de coletor: $h_{11} = 3,5 \text{ K}\Omega$ $h_{12} = 1,3 (10^{-4})$ $h_{21} = 120$ $h_{22} = 8,5 \mu\text{S}$

Fórmulas de Análise



$r_S \rightarrow$ resistência Thevenin ca introduzida nos terminais de entrada
 $r_L \rightarrow$ resistência de carga ca equivalente ligada aos terminais de saída

42/70

Eletrônica Analógica

Ganho de Corrente (A_i) i_1
 h_{21} v_1
 h_{22} i_2

h_{12} $A = +$

$A = \Rightarrow$

= , como $v_2 = -i_2 r_L$ temos:

$$\frac{i_1}{1} = \frac{h_{21} i_2}{1} + \frac{h_{22} v_2}{1}$$

$$i_1 r_L = i_2$$

$$A = \frac{h_{21}}{h_{22} r_L + 1}$$

h_{12} i_1

$$i_1 = \frac{h_{12} v_2}{1} + \frac{h_{21} i_2}{1}$$

$$i_1 = h_{21} i_2 - h_{22} v_2 \Rightarrow A = \frac{h_{21}}{h_{22} r_L + 1}$$

$$i_1 = h_{21} i_2 - h_{22} v_2$$

Ganho de Tensão (A_v)

v_1
 v_2

1

$-i_2 r_{L2}$

$A_v = \Rightarrow$

A_{v+}

2

$=$

$+$

$=$

v_1

v_2

1

11 1 12 2

11 1 12 2 L

Dividindo o numerador e o denominador por i_2 temos:

$-r$

$$A_{v+} = \frac{-h_{11} r_{12} L}{-h_{21} r_{21} L}$$

$v_2 (h_{11} h_{12} h_{21} h_{22}) r_{11} r_{12} r_{21} r_{22} L$

= Utilizando a equação * obtemos: A_{v-}

$v_1 / A_{v+} h_{11} r_{12} L$

Impedância de Entrada

v_1

$h_{11} i_1$

$+$

$h_{12} v_2$

$h_{21} i_1$

$h_{22} v_2$

$Z_{ent} =$

$=$ como $v_2 = -i_2 r_L$ temos: i_1

i_1

11

i_1

1

1

$h_{11} r$

12 2 L

$Z_{ent} =$

$=$ Utilizando a equação * obtemos:

i_1

1

$h_{11} - A_{v+} h_{12} r_{21} L$

$$Z_{ent} = \frac{h_{11} r_{12} L}{h_{11} - A_{v+} h_{12} r_{21} L}$$

Impedância de Saída

Procedimento: Reduzir a tensão de entrada a zero e alimentar os terminais de saída com um sinal v_2 .



v_2

v

$$\begin{matrix} i \\ + \\ 2 \\ 2 \\ Z \\ + \\ = \\ 12 \end{matrix} 2$$

$$= -h_{fe} v_{be}$$

= Na entrada, utilizando a Lei de Ohm

temos: $i_{be} = \frac{v_{be}}{r_{be}}$

Substituindo na primeira equação e rearranjando

temos : **Análise EC**

$$\begin{matrix} Z \\ + \\ + \\ r_{be} \end{matrix}$$

$$= \frac{h_{fe} h_{re} h_{ie} h_{oe} + h_{re} h_{fe} h_{ie} h_{oe}}{h_{ie} h_{oe} + h_{re} h_{fe}}$$

Os parâmetros h de um transistor podem ser relacionados da seguinte forma: $h_{ie} = h_{11}$ impedância de entrada com a saída em curto $i =$ entrada (input) $h_{fe} = h_{21}$ ganho de corrente direto com a saída em curto $f =$ direto (forward) $h_{re} = h_{12}$ ganho de tensão reverso com a entrada aberta $r =$ reverso (reverse) $h_{oe} = h_{22}$ admitância de saída com a entrada aberta $o =$ saída (output)

Os parâmetros h de um transistor dependem do tipo de ligação usada: EC, CC ou BC. Para um amplificador EC, as fórmulas deduzidas anteriormente são:

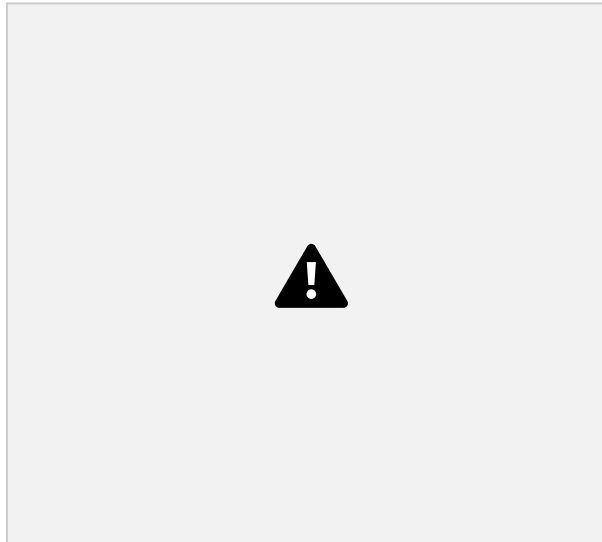
$$A_{v_{be}} = \frac{h_{fe}}{1 + h_{re} h_{fe}}$$

$$A_{v_{be}} = \frac{-h_{fe} r_{be}}{h_{ie} h_{oe} + h_{re} h_{fe}}$$

$$Z_{ent} = \frac{h_{ie}}{1 + h_{re} h_{fe}}$$

$$Z_{saída} = \frac{r_{be}}{h_{ie} h_{oe} + h_{re} h_{fe}}$$

CONFIGURAÇÃO DARLINGTON



A configuração Darlington consiste na ligação entre dois transistores na configuração seguidor de emissor, ligados em cascata, conforme ilustra a figura acima, proporcionando em relação a um único transistor um ganho de corrente bastante elevado.

O ganho total de tensão é aproximadamente igual a 1.

Se $\beta_1 = \beta_2 = 100$, teremos: $I_{C1} = I_{E1}$ e $I_{C2} = I_{E2}$

O ganho total (β_T) será dado por: $\beta_1 \cdot \beta_2 = 100 \cdot 100 = 10.000$

Assim, $I_{C2} = \beta_T \cdot I_{B1}$

A tensão entre base e emissor é dada por: $V_{BE} = V_{BE1} + V_{BE2}$

Por se tratar da configuração emissor comum, assume valor bastante elevado de impedância de entrada e valor bastante baixo de impedância de saída, em relação a um transistor comum. A configuração Darlington normalmente é encontrada em um único invólucro, como por exemplo, os transistores BD262 e BD263, com polaridades *pnp* e *nnp* respectivamente.

Os circuitos digitais são os que utilizam o transistor como uma chave. Os circuitos lineares são os que o utilizam como uma fonte de corrente. Acionar um LED com um transistor

fonte de corrente é um exemplo de um circuito linear. Um outro exemplo é o amplificador, um circuito que aumenta a amplitude de um sinal. A idéia consiste em colocar um pequeno sinal ca num transistor e ter na saída um sinal ca maior de mesma freqüência. Os amplificadores são fundamentais nos circuitos de rádio, televisão e outros circuitos de comunicação.

Antes do sinal ca ser acoplado a um transistor, é preciso estabelecer um ponto quiescente (Q) de operação, geralmente próximo ao meio da linha de carga cc. Então, o sinal ca que entra pode produzir flutuações acima e abaixo desse ponto Q. Para que o circuito permaneça linear, o diodo emissor precisa estar polarizado diretamente e o diodo coletor polarizado reversamente. Colocando de outra forma, as flutuações na corrente e na tensão não devem levar o transistor nem à saturação nem ao corte.

POLARIZAÇÃO DA BASE



Ao lado temos exemplos de polarização da base (também chamada polarização fixa). Geralmente, a fonte de alimentação da base é a mesma que alimenta o coletor; isto é, $V_{BB} = V_{CC}$.

Em qualquer dos dois casos este é o pior modo possível de se polarizar um transistor para que ele funcione linearmente, pois o ponto

Q é instável. Pois β_{CC} pode ter uma variação de até 3:1 com a corrente e a temperatura. Isto quer dizer que é impossível estabelecer um ponto Q estável, no que podemos nos basear na produção em grande escala. Portanto, nunca usamos a polarização da base em circuitos lineares.

- A utilização mais elementar da polarização da base é nos circuitos digitais, nos quais o transistor é usado como uma chave entre o corte e a saturação. Neste caso, usamos a saturação forte para ultrapassar as variações em β_{CC} .

POLARIZAÇÃO COM REALIMENTAÇÃO DO EMISSOR



A figura ao lado mostra uma tentativa inicial de se compensar as variações em β_{CC} .

Geralmente, as alimentações da base e do coletor são iguais e o circuito é desenhado como no segundo circuito. Em qualquer dos dois casos, a idéia consiste em se tentar usar a tensão através do resistor do emissor para compensar as variações em β_{CC} . Por exemplo,

se β_{CC} aumentar, a corrente do coletor aumenta. Isto aumenta a tensão do emissor, o que diminui a tensão através do resistor da base e reduz a corrente da base. A corrente da base reduzida resulta numa corrente do coletor menor, o que compensa parcialmente o aumento original em β_{CC} .

Efeito de β_{CC} e limitações práticas

Malha de Entrada:

$$V_{CC} = V_{BE} + I_E R_E + I_B R_B \text{ Como } I_E \cong I_C \text{ e } I_B = I_C / \beta_{CC} \text{ temos:}$$

$$V_{CC} = V_{BE} + I_C R_E + \frac{I_C R_B}{\beta_{CC}}$$

$$\cong V_{CC} = V_{BE} + I_C R_E \left(1 + \frac{R_B}{\beta_{CC} R_E} \right)$$

A polarização com realimentação do emissor pretende encobrir as variações em β_{CC} ; isto equivale a R_E ser muito maior do que R_B / β_{CC} . Nos circuitos práticos, entretanto, você não pode fazer R_E suficiente grande para encobrir os efeitos de β_{CC} sem saturar o transistor. Logo a polarização com realimentação do emissor não é a forma preferida de polarização, e evitaremos utilizá-la.

POLARIZAÇÃO COM REALIMENTAÇÃO DO COLETOR

Na polarização com realimentação do coletor (também chamada de autopolarização), o resistor da base é reconduzido ao coletor e não à fonte de alimentação, conforme figura ao lado.

Supondo um aumento na temperatura, β_{CC} aumenta. Isto produz mais corrente no coletor. Com o aumento da corrente de coletor, V_{CE} diminui (aumento da queda de tensão em R_C). Logo temos uma tensão menor através do resistor da base, diminuindo a corrente da base. Esta diminuição na corrente da base compensa o aumento inicial na corrente do coletor.

Linha de Carga CC

Somando-se as tensões ao longo da malha do coletor temos: $V_{CC} = (I_C + I_B) R_C + V_{CE}$, Como $I_C \gg I_B$ na região ativa temos:

$$\cong V_{CC} - I_C R_C$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

Efeito de β_{CC}

Somando-se as tensões na malha da base: $V_{CC} = (I_C + I_B) R_C + I_B R_B + V_{BE} = 0$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (1 + \beta_{CC}) R_C}$$

$$\cong \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + R_C}$$

$V_{CC} \cong I_C R_C + I_B R_B + V_{BE}$ Como $I_B = I_C / \beta_{CC}$, $V_{CC} \cong I_C R_C + I_C R_B / \beta_{CC} + V_{BE}$ temos:

A polarização com realimentação do coletor é um pouco mais eficiente do que a polarização com realimentação do emissor. Embora o circuito ainda seja sensível a variações em β_{CC} , é usado na prática.

✓ A polarização com realimentação do coletor tem uma outra vantagem sobre o emissor polarizado, você não pode saturar o transistor.

POLARIZAÇÃO POR DIVISOR DE TENSÃO

A polarização por divisor de tensão (também chamada de polarização universal) é a polarização mais usada em circuitos lineares. O nome divisor de tensão provém do divisor de tensão formado por R_1 e R_2 . A tensão através de R_2 polariza diretamente o diodo emissor.

$$\begin{aligned} \text{Corrente de Emissor: } I_E &= \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_E} \\ V_{TH} &= V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \\ R_{TH} &= R_1 \parallel R_2 \end{aligned}$$

Pelo fato do emissor estar amarrado à base temos:

$$I_E = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + R_E}$$

CIRCUITO SIMPLIFICADO

Na região ativa: $I_E \cong I_C$

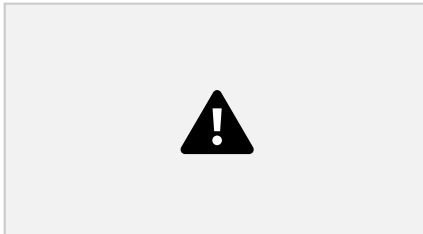
Observe que β_{CC} não aparece na fórmula para a corrente de emissor. Isto quer dizer que o circuito é imune a variações em β_{CC} , o que implica em um ponto Q fixo. Logo este é o tipo preferido de polarização nos circuitos lineares.

Divisor de Tensão Estabilizado:

Thevenizando o circuito do divisor de tensão obtemos:

Onde:

$$R_{TH} = R_1 \parallel R_2$$



Somando-se as tensões na malha da base
temos: $V_{TH} = I_E R_E + V_{BE} + I_B R_{TH}$
Como $I_B = I_C / \beta_{CC}$ e $I_E \cong I_C$, temos:

46/70

Eletrônica Analógica

$$I_E = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + R_E}$$

$$I_E \cong \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + R_E / \beta_{CC}}$$

$$\cong \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + \frac{R_E}{\beta_{CC}}}$$

Se R_E for 100 vezes maior do que R_{TH} / β_{CC} teremos:

$$I_E \cong$$

$$\frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_E}$$

Divisor de tensão estabilizado deve satisfazer a esta condição: $R_{TH} \leq 0,01 \beta_{CC} R_E^*$

Onde β_{CC} será o mínimo encontrado sob quaisquer condições.

Geralmente R_2 é menor do que R_1 e a equação * simplifica-se na forma:

$$R_2 \leq 0,01 \beta_{CC} R_E$$

Utilizaremos esta equação para **projetar divisores de tensão quase-ideais**.

Divisor de Tensão Firme:

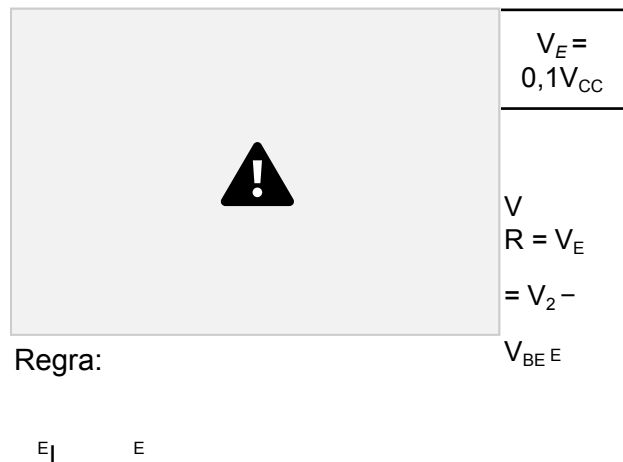
Às vezes um projeto quase-ideal resulta em valores tão pequenos de R_1 e R_2 que surgem problemas (impedância de entrada). Neste caso, muitos projetos são ajustados utilizando esta regra:

$R_{TH} \leq 0,1\beta_{CC}R_E$ Então utilizaremos

$$R_2 \leq 0,1\beta_{CC}R_E$$

esta equação: **Projeto do Divisor de**

Tensão (Ponto Q estável):



- Posicionando o ponto Q aproximadamente no meio da linha de carga cc, cerca de $0,5 V_{CC}$ aparece através dos terminais do coletor-emissor. Os $0,4 V_{CC}$ restantes aparecem através do resistor do coletor. Logo:

$$R_C = 4R_E$$

Se projetamos um divisor de tensão quase ideal utilizamos a regra 100:1

$$R_2 \leq 0,01\beta_{CC}R_E$$

Se preferimos um divisor de tensão firme utilizaremos a regra 10:1

$$R_2 \leq 0,1\beta_{CC}R_E$$

Finalmente calculamos R_1 através da proporção:

$$R = \frac{V_1}{I_1}$$

$$V_2$$

Capacitor de Acoplamento

Um capacitor de acoplamento acopla um ponto não aterrado a outro ponto não aterrado (acoplar significa deixar passar somente o sinal ca, bloqueando a componente contínua).

$$V_{TH} = \frac{V_{TH} R_L}{R_{TH} + R_L}$$

$$I_{TH} = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_L}$$

$$V_C = I_{TH} X_C = \frac{V_{TH} R_L X_C}{R_{TH} + R_L + X_C}$$

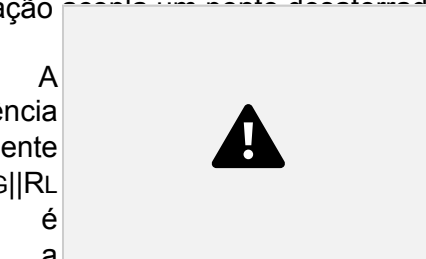


Capacitor de Desvio

O capacitor de derivação conecta um ponto desaterrado a um ponto aterrado.



A resistência equivalente $R = R_G || R_L$ é a



resistência de Thevenin vista pelo capacitor.

$$V_{TH} = \frac{V_{TH} R_L}{R_{TH} + R_L}$$

$$I_{TH} = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_L}$$

$$V_C = I_{TH} X_C = \frac{V_{TH} R_L X_C}{R_{TH} + R_L + X_C}$$

Frequência Crítica (f_c) $\rightarrow X_C = R$ Se $X_C = R \rightarrow \frac{1}{\omega C} = R \rightarrow \omega = \frac{1}{RC} \rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi RC}$

Logo $R = \frac{1}{2\pi f_c C}$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$I_{TH} = \frac{V_{TH}}{R \sqrt{2}} = \frac{V_{TH}}{R \sqrt{2}}$$

Alta Frequência de Quina (f_h): A resistência total deve ser no mínimo 10 vezes maior que a reatância capacitiva. $f_h \geq 10f_c$

$$\text{Se } X_c \leq 0,1R \rightarrow R_V$$

V

$|_{TH TH}$

= (Acoplamento quase ideal)

$$R_{22} = R_{(0,1.R)} + 0,995$$

Circuito Equivalente CC: Reduzimos a fonte ca a zero e abrimos todos os capacitores.

Circuito Equivalente CA: Reduzimos todas as fontes cc a zero e curto-circuitamos todos os capacitores.



48/70

Eletrônica Analógica

Operação em Pequeno Sinal

Quando polarizamos um transistor, aplicamos uma tensão de polarização CC (V_{BE}) à base. Quando um sinal é aplicado à entrada do amplificador a tensão oscilará acima e abaixo de V_{BE} , portanto existirá uma variação de tensão ao redor do ponto quiescente (ΔV_{BE}) o que provocará uma variação (ΔI_E) de corrente ao redor do valor quiescente. Um amplificador é chamado de pequeno sinais se a amplitude do sinal for suficientemente pequena de forma que a operação do mesmo se dá na região linear da curva $I_E \times V_{BE}$.

um sinal, ΔV_{BE} , aplicado na base e a resposta, ΔI_E .

Uma forma de reduzir a distorção observada no gráfico abaixo é manter a tensão ca da base pequena. Se o sinal for suficientemente pequeno, o gráfico terá uma aparência linear.





Regra dos 10%

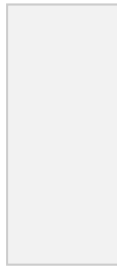
O sinal ca será considerado pequeno quando a corrente ca de pico a pico for menor que 10% da corrente cc do emissor.

Resistência ca do Diodo Emissor (r'_e)

$$\frac{V}{25\text{mV}}$$

$$\Delta v_{BE} = r'_e \Delta i_E$$

$$r'_e = \frac{\Delta v_{BE}}{\Delta i_E}$$



I

E

c

Beta CA

(h_{fe}):

$\beta =$

Δ

\rightarrow

$\beta =$

i_c

i_c

e

E

Δ

I

b

i

b

Δ

Amplificador Emissor Comum: emissor está aterrado para ca.



Circuito Equivalente CA

Inversão de Fase: Semiciclo positivo de $V_{ent} \rightarrow i_b$ aumenta $\rightarrow i_c$ aumenta \rightarrow queda de tensão em R_c aumenta $\rightarrow V_{CE}$ diminui (semiciclo negativo).

Logo no amplificador emissor comum a saída está defasada de 180° em relação à entrada.



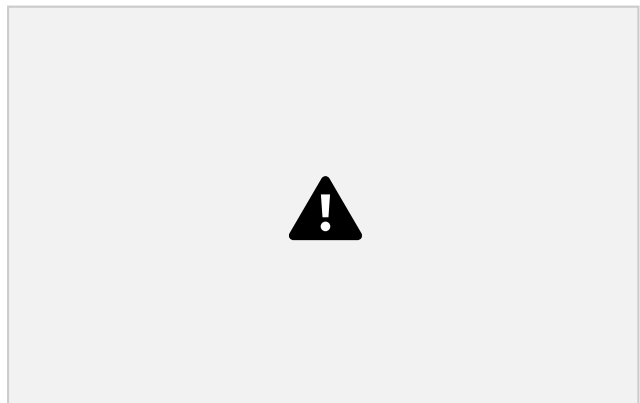
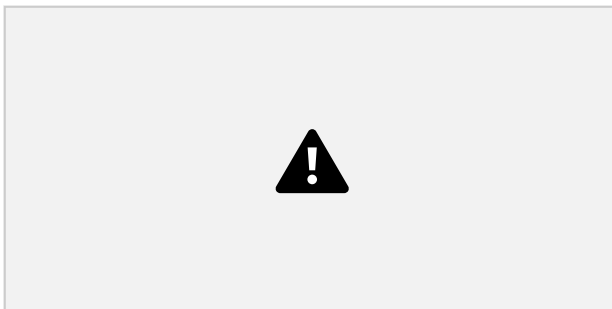
Impedância de Entrada da Base: v_{be} i_{be}

$$Z_{in} = \beta \frac{r_{ie}}{1 + \beta} \parallel R_{B1} \parallel R_{B2}$$

Impedância de Entrada do Estágio: $Z_{in} = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel \beta r_{ie}$

Utilizando os Parâmetros CA da r =
Folha de Dados: r_{ie}

Amplificadores de Tensão



Modelo T

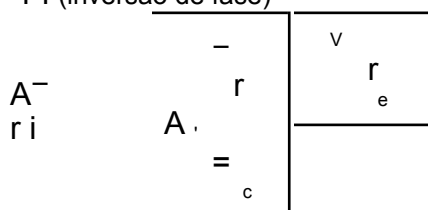
Resistência ca do Coletor (r_c): $r_c = R_C \parallel R_L$

Os Valores rms e de Pico a Pico: $v_{PP} = 2v_{rms}$

Ganho de Tensão (A_v): $A_v = \frac{v_{saída}}{v_{entrada}} = \frac{v_c}{v_{ie}} \approx \frac{r_c}{r_{ie}}$

c

saída c c $v = -r_{ie} i_b$ (inversão de fase)



$$v_c = -\beta r_{ie} i_b$$

$$v_{ri}$$

e c

Amplificador com Realimentação Parcial (Amplificador Linearizado): Para estabilizar o ganho de tensão devemos deixar uma certa resistência sem ser desviada para ocasionar uma realimentação negativa.

Ganho de Tensão:

$$A_v = \frac{v_c}{v_{be}} = \frac{A_{v+}}{1 + A_{v+} r_e}$$

Trocando ganho por estabilidade:

Se r_e for maior que r'_e , as variações de r'_e serão encobertas por r_e (reduzidas drasticamente).

Para a figura à esquerda $r_e = 180\Omega$.

$$z_{ent(base)} = r_e + \frac{z_{ent(emissor)}}{\beta + 1}$$

Impedância de Entrada da Base: $z_{ent(base)} \rightarrow = \beta +$

$$= \frac{i_b}{i_{be}} = \frac{z_{ent(emissor)}}{\beta + 1}$$

■ Ganho mais estável, distorção devido à não linearidade do diodo base-emissor é menor.

51/70

Eletrônica Analógica

Estágios em Cascata:

A corrente i_c no primeiro coletor tem vários caminhos para circulação, através da resistência R_c do primeiro estágio ($3,6K\Omega$), dos resistores de polarização do segundo estágio ($10K\Omega$ e $2,2K\Omega$) e para dentro da base do segundo transistor ($z_{ent(base)}$).

Circuito equivalente ca do segundo estágio:

$z_{ent(base)} = 2,27K\Omega$ (impedância de entrada de base do 2º estágio)

Calculamos o ganho de tensão do primeiro estágio (A_1) e depois calculamos o ganho de tensão do segundo estágio (A_2).

O ganho total será dado por: $A = A_1 \cdot A_2$

Impedância de Saída: importante porque interage com o resistor de carga para determinar a tensão ca na carga.



A impedância de saída é também chamada de impedância Thevenin. Ao lado vemos o circuito equivalente para o lado da saída do amplificador EC. O resistor de carga foi desconectado porque estamos aplicando o teorema de Thevenin no circuito.

A tensão Thevenin na saída é dada por: $V_{th} = \beta i_b R_c = i_c R_c$

Para obter a impedância de Thevenin, devemos reduzir a fonte de corrente a zero (circuito aberto).

Logo $r_{th} = R_c$



Quanto maior for R_L em relação à R_c , maior será a tensão de saída.

Modelo do Transistor:



Onde: $A = - \frac{r_c}{r_e}$

v_{r_e}

$$Z_e = R_1 \parallel R_2 \parallel$$

$$Z_{e(base)} Z_s = R_c$$

V_e = tensão de entrada

V_s = tensão de saída

52/70

Eletrônica Analógica

Amplificador Base Comum



Modelo T

Impedância de Entrada:

$$Z_{ent} = R \parallel r \rightarrow Z_{ent} \cong r$$



Tensão de Saída: $v_{saída} = i_c R_C$

Tensão de Entrada: $v_{ent} = i_r r_e$

$\frac{v_{saída}}{v_{ent}} = \frac{i_c R_C}{i_r r_e} = \frac{R_C}{r_e}$

$A_v = \frac{v_{saída}}{v_{ent}} = \frac{R_C}{r_e}$

Ganho de Tensão: $A_v = \frac{v_{saída}}{v_{ent}}$

Impedância de $Z_{ent} = r_e$

Saída: $Z_{saída} = R_C$

■ Uma das razões pelas quais o amplificador BC não é tão usado quanto um amplificador EC é sua baixa impedância de entrada. Por isso o amplificador BC não é muito usado em baixas frequências. Ele é usado principalmente em aplicações de altas frequências (acima de 10MHz), onde as fontes de baixa impedância são comuns.

Amplificador Coletor Comum (Seguidor de Emissor)



$v_{ent} = i_b r_b + i_e r_e$

$Z_{ent(base)} = r_b + \frac{r_e}{\beta + 1}$

Impedância de $Z_{ent(base)}$
Entrada da Base:

$Z_{ent(base)} = r_b + \frac{r_e}{\beta + 1}$

Impedância de Entrada do

$Z_{ent} = R_1 // R_2 // Z_{ent(base)}$

Est $v_{ent} = i_b r_b + i_e r_e$

ágio $i_r = i_b + i_e$

$A_v = \frac{v_{saída}}{v_{ent}}$

$A_v = \frac{v_{saída}}{v_{ent}} = \frac{i_e r_e}{i_b r_b + i_e r_e} = \frac{r_e}{r_b + r_e}$

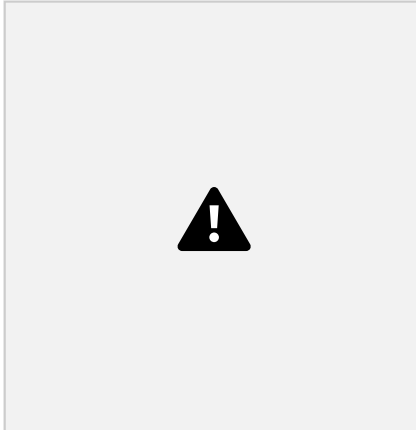
Ganho de Tensão (A_v): $(r_r) v_+$

$$\frac{v_o}{v_{entrada}} = \frac{i(r_r)}{+}$$

53/70

Eletrônica Analógica

Impedância de Saída: Aplicando o teorema de Thevenin a partir da base no Modelo T temos:



$$R_{th} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_G$$

$$= \frac{V_G}{v \parallel (R \parallel R)_+}$$

$$= \frac{v_{th \text{ ent } 1 \ 2} (R \parallel R) R}{1 \ 2 \ G}$$

Somando-se as tensões da malha temos:

$$V_{ent} = (R_1 \parallel R_2 \parallel R_G) i_b + r'_e i_e + R_E i_e$$

$$\text{Como } i_b = i_c / \beta$$

$$i_e = \frac{v_{ent}}{R \parallel r \parallel (R \parallel R \parallel R)_+} + \beta$$

O resistor de emissor, R_E é acionado por uma fonte ca com uma impedância Thevenin de:

$$= + (R \parallel R \parallel R)$$

$$\frac{r \parallel r' \parallel 1 \ 2 \ G}{\beta}$$

Então:

$$= + (R \parallel R \parallel R) r \parallel 1$$

$$2 \ G$$

$$\frac{\text{saída e}}{\beta}$$

■ Assim como um amplificador linearizado, o seguidor de emissor também usa realimentação negativa. A resistência de realimentação é igual à resistência total do emissor.

Sendo a realimentação negativa muito forte, o ganho de tensão é bastante estável, quase não existe distorção e a impedância de entrada da base é muito alta e a impedância de saída é muito baixa.

Anexo

FAMÍLIA TTL

A grande maioria dos circuitos integrados TTL pertencem às séries 54 e 74, introduzidos originalmente pela *Texas Instruments* e que são hoje um padrão da indústria, fornecidos por diversos fabricantes.

A série 54 é de uso militar e opera na faixa de temperatura de -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$, com uma tensão de alimentação de $5 \pm 0,5\text{ V}$.

A série 74 é de uso geral, operando na faixa de temperatura de 0°C a $+70^{\circ}\text{C}$, com alimentação de $5 \pm 0,25\text{ V}$.

Há centenas de funções disponíveis nas séries 54/74, abrangendo portas lógicas, flip flops, decodificadores, contadores, etc.

Conforme o número de portas contidas em um CI (circuito integrado), ele se classifica:

SSI (Small Scale Integration) ou integração em pequena escala – de 1 a 12 portas lógicas.

MSI (Medium Scale Integraton) ou integração em média escala – de 13 a 99 portas lógicas.

LSI (Large Scale Integration) ou integração em grande escala – de 100 a 1.000 portas lógicas.

VLSI (Very Large Scale Integration) ou integração em escala muito grande – acima de

1.000 portas lógicas.

Além da série 54/74, que é a mais importante e que possui o maior número de funções disponíveis, existem algumas outras séries como a 4000 MTLL da Motorola e a 8200 da Signetics.

Versões Distintas:

- ✓ 54/74 – Standard
- ✓ 54/74L – Low Power
- ✓ 54/74H – High Speed
- ✓ 54/74S – Schottky
- ✓ 54/74LS – Low Power Schottky

FAMÍLIA CMOS – Utiliza Transistor de efeito de campo do tipo MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor).



Código de capacitores

Capacitores

Alguns capacitores apresentam uma codificação que é um tanto estranha, mesmo para os técnicos experientes, e muito difícil de compreender para o técnico novato. Observemos o exemplo abaixo:



O valor do capacitor, "**B**", é de 3300pF (picofarad

= 10^{-12} F) ou 3,3nF (nanofarad = 10^{-9} F) ou 0,033 μ F (microfarad = 10^{-6} F). No capacitor "A", devemos acrescentar mais 4 zeros após os dois primeiros algarismos. O valor do capacitor, que se lê 104, é de 100000pF ou 100nF ou 0,1 μ F.

Capacitores usando letras em seus valores



O desenho ao lado, mostra capacitores que tem os seus valores, impressos em nanofarad (nF) = 10^{-9} F. Quando aparece no capacitor uma letra "n" minúscula, como um dos tipos apresentados ao lado por exemplo: 3n3, significa que este capacitor é de 3,3nF. No exemplo, o "n" minúsculo é colocado ao meio dos números, apenas para economizar uma vírgula e evitar erro de interpretação de seu valor.

Multiplicando-se 3,3 por 10^{-9} = (0,000.000.001), teremos 0,000.000.003.3F. Para se transformar este valor em microfarad, devemos dividir por 10^{-6} = (0,000.001), que será igual a 0,0033 μ F. Para voltarmos ao valor em nF, devemos pegar 0,000.000.003.3F e dividir por 10^{-9} = (0,000.000.001), o resultado é 3,3nF ou 3n3F.

Para transformar em picofarad, pegamos 0,000.000.003.3F e dividimos por 10^{-12} , resultando 3300 pF. Alguns fabricantes fazem capacitores com formatos e valores impressos como os apresentados abaixo. O nosso exemplo, de 3300pF, é o primeiro da fila.



Note nos capacitores seguintes, envolvidos com um círculo azul, o aparecimento de uma letra maiúscula ao lado dos números. Esta letra refere-se a tolerância do capacitor, ou seja, o quanto que o capacitor pode variar de seu valor em uma temperatura padrão de 25° C. A letra "J" significa que este capacitor pode variar até $\pm 5\%$ de seu valor, a letra "K" = $\pm 10\%$ ou "M" = $\pm 20\%$. Seguem na tabela abaixo, os códigos de tolerâncias de capacitância.

Código

Até 10pF	Acima de 10pF
----------	---------------

$\pm 0,1$ pF	
--------------	--

B

$\pm 0,25$ pF	
---------------	--

$\pm 0,5$ pF	
--------------	--

C

F

D

$\pm 1,0\text{pF } \pm 1\%$

G

Z

H

P

J

$\pm 2\%$

$\pm 3\%$

K

$\pm 5\%$

$\pm 10\%$

$\pm 20\%$

M

$-50\% -20\%$

$+80\%$

-20% ou

$+100\%$

S

-20%

$+100\% -0\%$

Agora, um pouco sobre coeficiente de temperatura "TC", que define a variação da capacitância dentro de uma determinada faixa de temperatura. O "TC" é normalmente expresso em % ou ppm/°C (partes por milhão / °C). É usado uma seqüência de letras ou letras e números para representar os coeficientes. Observe o desenho abaixo.



Os capacitores ao lado são de coeficiente de temperatura linear e definido, com alta estabilidade de capacitância e perdas mínimas, sendo recomendados para aplicação em circuitos ressonantes, filtros, compensação de temperatura e acoplamento e filtragem em circuitos de RF.

Na tabela abaixo estão mais alguns coeficientes de temperatura e as tolerâncias que são muito utilizadas por diversos fabricantes de capacitores.

Código Coeficiente de temperatura

NPO $-0\pm 30\text{ppm}/^\circ\text{C}$

N075 $-75\pm 30\text{ppm}/^\circ\text{C}$

N150 $-150\pm 30\text{ppm}/^\circ\text{C}$

N220 $-220\pm 60\text{ppm}/^\circ\text{C}$

N330 $-330\pm 60\text{ppm}/^\circ\text{C}$

N470 $-470\pm 60\text{ppm}/^\circ\text{C}$

N750 -750± 120ppm/°C
 N1500 -1500± 250ppm/°C
 N2200 -2200± 500ppm/°C
 N3300 -3300± 500ppm/°C
 N4700 -4700± 1000ppm/°C
 N5250 -5250± 1000ppm/°C
 P100 +100± 30ppm/°C

Outra forma de representar coeficientes de temperatura é mostrado abaixo. É usada em capacitores que se caracterizam pela alta capacitância por unidade de volume (dimensões reduzidas) devido a alta constante dielétrica sendo recomendados para aplicação em desacoplamentos, acoplamentos e supressão de interferências em baixas tensões.



Os coeficientes são também representados com seqüências de letras e números como por exemplo: X7R, Y5F e Z5U. Para um capacitor Z5U, a faixa de operação é de +10°C que significa "Temperatura Mínima" e +85°C que significa "Temperatura Máxima" e uma variação de "Máxima de capacitância", dentro desses limites de temperatura, que não ultrapassa -56%, +22%.

Veja as três tabelas abaixo para compreender este exemplo e entender outros coeficientes.

Temperatura Mínima	Temperatura Máxima	Variação Máxima de Capacitância
X -55°C Y -30°C Z +10°C	2 +45°C 4 +65°C 5 +85°C 6 +105°C 7 +125°C	A ±1.0% B ±1.5% C ±2.2% D ±3.3% E ±4.7% F ±7.5% P ±10% R ±15% S ±22% T -33%, +22% U -56%, +22% V -82%, +22%

Capacitores de Cerâmica Multicamada



A tabela abaixo, mostra como interpretar o código de cores dos capacitores abaixo. No capacitor "A", as 3 primeiras cores são, laranja, laranja e laranja, correspondem a 33000, equivalendo a 3,3nF. A cor branca, logo adiante, é referente a $\pm 10\%$ de tolerância. E o vermelho, representa a tensão nominal, que é de 250 volts.



	1ª Algarismo	2ª Algaris	5ª Tensão
PRETO -	0		0 -
	1		1 0 -
MARROM -			2 00 -
VERMELHO 2 250V	3		3 000 -

LARANJA -

4

4	0000	-
---	------	---

AMARELO 400V

5

5	00000	-
---	-------	---

VERDE -

6

6	-	-
---	---	---

AZUL 630V

7

7	-	-
---	---	---

VIOLETA -

8

8	-	-
---	---	---

CINZA -

9

9	-	± 10%
---	---	-------

BRANCO -

Capacitores Eletrolíticos

Os capacitores eletrolíticos fornecem mais capacitância com menor tamanho e peso do que qualquer dos outros tipos de capacitores. Esta é sua vantagem original sobre os demais.

Um capacitor eletrolítico comum é constituído de duas placas de alumínio separadas por uma camada de fina gaze ou outro material absorvente. As placas e os separadores são longos e de faixa estreita. Estas faixas são enroladas e inseridas em *containers* de alumínio (Figura 1). Uma placa (a placa negativa) é conectada eletricamente ao *container* de alumínio. Os terminais elétricos das placas são levados para fora dos *containers*, e estes são selados.

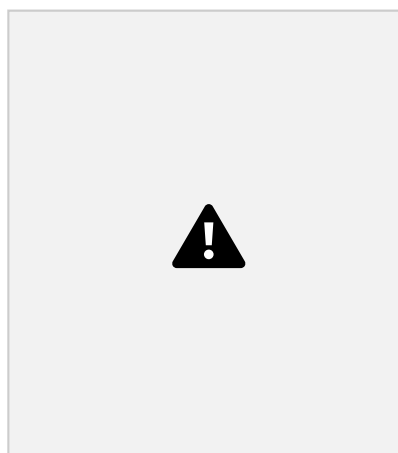


Figura 1 - Capacitor eletrolítico. O *container* é conectado eletricamente à placa negativa.

Uma das placas do alumínio na Figura 1 é oxidada. Desde que o óxido de alumínio é um

isolante, ele é usado como dielétrico. Os separadores são saturados com uma solução química (tal como borato de sódio), a qual é denominada *eletrólito*. O eletrólito tem relativamente boa condutividade e serve como parte de uma das placas de um capacitor (Figura 2). Ele está em contato direto com o dielétrico e com a placa de alumínio puro. O eletrólito é também necessário na formação e manutenção do óxido em uma das placas.

O método usado para produzir os capacitores eletrolíticos resulta na polarização das placas. Quando usar estes capacitores, mantenha sempre a mesma polarização de tensão indicada pelo fabricante. Esta polarização é sempre marcada no corpo do capacitor. Novamente, o *container* de alumínio (que pode estar embrulhado num tubo isolante) é geralmente conectado à placa negativa; e nunca é conectado ao terminal positivo. A polaridade reversa num capacitor eletrolítico causa uma corrente excessiva, provocando o aquecimento demasiado do capacitor e possibilitando uma explosão. Então o capacitor eletrolítico comum é limitado ao uso em circuitos CC.

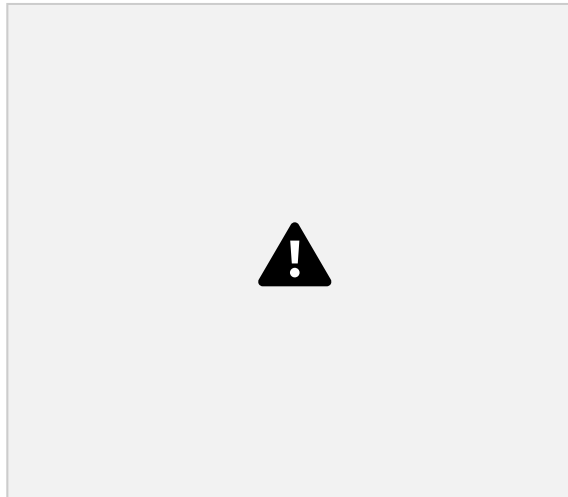


Figura 2 - Seção de um capacitor eletrolítico.

Os capacitores eletrolíticos especiais são fabricados para o uso em circuitos CA. Estes capacitores são geralmente citados em catálogos como *não-polarizados* ou capacitores eletrolíticos CA. Um capacitor eletrolítico CA é realmente dois capacitores eletrolíticos encapsulados em um *container* simples (Figura 3). Independentemente da polaridade nos terminais de um capacitor eletrolítico CA, um dos dois capacitores internos será polarizado corretamente. O capacitor polarizado corretamente limitará a corrente que circula através do capacitor polarizado reversamente.

Muitos capacitores eletrolíticos não-polarizados são empregados somente em uso intermitente. Estes capacitores se sobreaquecem (e muitas vezes se rompem) se usados por longos períodos de tempo.

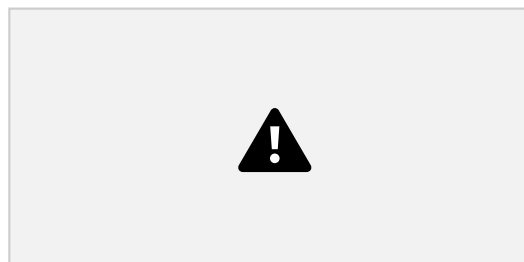


Figura 3 - Capacitor eletrolítico não-polarizado. Independentemente da polaridade do terminal, um dos capacitores será polarizado corretamente.

O óxido na placa positiva de um capacitor eletrolítico, Figura 2, é muito fino (aproximadamente 0,25 μm de espessura) e áspero. Sua espessura mantém as placas muito

próximas e sua rugosidade efetivamente aumenta a área da placa. Estes dois fatores fazem a capacitância de um capacitor eletrolítico muito elevada para seu peso e volume.

O *tântalo*, elemento metálico condutivo, é também usado para as placas de um capacitor eletrolítico. Os capacitores eletrolíticos de tântalo são menores, mais estáveis e mais confiáveis que os capacitores eletrolíticos de alumínio. Um dielétrico óxido está longe de ser um isolante perfeito; por conseguinte, alguns elétrons encontram seu caminho de uma placa para a outra. Isto produz uma *corrente de fuga*. Os capacitores eletrolíticos de tântalo têm menos corrente de fuga (mais alta resistência dielétrica) que os capacitores eletrolíticos de alumínio. Contudo, os capacitores eletrolíticos de tântalo são mais caros do que os de alumínio.

Matriz de Contato

Uma matriz de contato também chamada de *protoboard* é usada para fazer montagens provisórias, teste de projetos entre outras inúmeras utilizações.

Na superfície de uma matriz de contato há uma base de plástico em que existem centenas de orifícios onde são encaixados os componentes, já em sua parte inferior são instalados contatos metálicos interligados segundo um padrão básico que o usuário precisa conhecer.

Como usar a matriz de contato

Na figura abaixo temos uma matriz de contato básica, pode existir *protoboard* com mais de uma matriz básica, nela existe duas filas horizontais, uma na parte superior e outra na parte inferior. Todos os furos da fila horizontais superior estão interligados entre si, o mesmo ocorre com a fila horizontal inferior, de forma independente.

OBS. 1: A fila horizontal superior e inferior geralmente são deixadas para ligar a



alimentação.

A região central da matriz de contato é dividida em filas verticais que contém cinco furos que são interligados eletricamente entre si. Assim todos os furos de uma mesma fila estão interligados entre si.



OBS. 2: Coluna de 5 furos superior não é interligado com a inferior.











