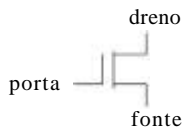
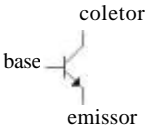


Transistores de Efeito de Campo (npn)	
<p>FET</p> 	<p>BJE</p> 
<p>dispositivo de 3 terminais corrente <math>e^-</math> de canal da fonte para dreno controlada pelo campo elétrico gerado pelo porta</p> <p>impedância de entrada extremamente alta para base</p>	<p>corrente <math>e^-</math> de emissor para coletor controlada pela corrente injetada na base</p>
6.071 Transistores de Efeito de Campo	1

Há muitos tipos de transistores além do transistor de junção bipolar (BJT) que discutimos até agora. Uma importante classe de transistores de 3 terminais são os dispositivos de efeito de campo. Para estes, o parâmetro de controle é o campo elétrico através da junção, em oposição à corrente do BJT. Já que um campo elétrico está associado a uma tensão, a vantagem importante dos dispositivos de efeito de campo é que não precisa haver uma corrente no elemento de controle (a porta). Isso resulta em uma impedância de entrada bastante elevada, e uma corrente de fuga bastante baixa.

Os mais fáceis de entender são os transistores de efeito de campo de junção (JFETs), que iremos discutir primeiro e com um certo detalhe. Os FETs semicondutores de óxido de metal (MOSFETs) são muito importantes para implementações de lógica digital.

**Tipos de FETs**

Além do tipo portador (canal N ou P), existem diferenças em como o elemento de controle é construído (Junção vs Isolado), e esses dispositivos devem ser usados de formas diferentes

FETs de junção de modo de depleção (JFET) npn  
pnp

FET de semiconductor de óxido de metal (MOSFET) npn  
pnp

- modo de depleção/ crescimento
- modo de crescimento

(FETs e IGFETs de porta isolado são a mesma coisa que MOSFETs)


6.071 Transistores de Efeito de Campo 2

Assim como ocorre com os BJTs, há sempre dois tipos de transistores, npn e pnp. A diferença está no portador majoritário (elétrons ou lacunas).

Já que os FETs são controlados por variações no campo elétrico através da junção, é possível construir um capacitor no elemento de controle a, dessa forma, reduzir ainda mais a corrente de fuga. O óxido de metal de um MOSFET forma o capacitor na entrada do elemento de controle (a porta).

**Operação FET básica Nº 1**

O exemplo mais simples de um JFET começa com Si dopado por N.

fonte            dreno

fonte – terminal no qual a corrente de portador é injetada  
(tipo n  $\therefore$  portadores  $e^-$ )

Nesse nível, o dispositivo é simplesmente um resistor. Portanto, a corrente flui através do canal em proporção à tensão do dreno/fonte.

6.071 Transistores de Efeito de Campo 3

Começaremos descrevendo a operação e controle de um JFET. A ação básica de um JFET pode ser compreendida considerando-se um canal de condução.

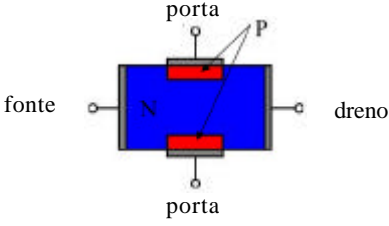
Comece com silício dopado por n e adicione dois terminais em cada extremidade. O dispositivo agora é um resistor, cuja resistência é fornecida pelo nível de dopagem.

Os três terminais do JFET são denominados fonte, dreno e porta. A fonte é análoga ao emissor do BJT. A fonte é a fonte dos portadores majoritários. Portanto, em um material de tipo n, os portadores são elétrons, e a fonte é, assim, a fonte de elétrons.

O dreno é análogo ao coletor do BJT e, portanto, a corrente dos portadores majoritários flui a partir da fonte para o dreno. Mais uma vez, em materiais do tipo n, os portadores são elétrons e a corrente convencional flui na direção oposta.

**Operação FET básica N° 2**

Adicione uma estrutura de porta para formar um canal.



As duas regiões da porta são, na verdade, conectadas para definir um canal para a corrente do portador.

O controle da corrente do FET (resistência) é atingido mudando-se o tamanho das zonas de depleção que circundam as portas.

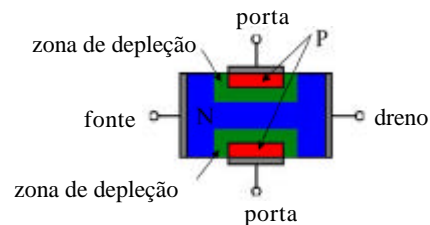
6.071 Transistores de Efeito de Campo 4

As portas são duas regiões de um material do tipo p que são dispostas para criar um canal para condução da fonte para o dreno. As duas regiões de porta são, quase sempre, conectadas para que o usuário veja apenas a conexão da porta.

Observe que o dispositivo acima é um JFET npn, já que a fonte é do tipo n, a porta é do tipo p e o dreno é do tipo n. Não olhe para baixo a partir da porta, canal e porta e chame-o de junção pnp.

### Operação FET básica N° 3

Ao redor de cada porta há uma zona de depleção, como em qualquer junção PN.

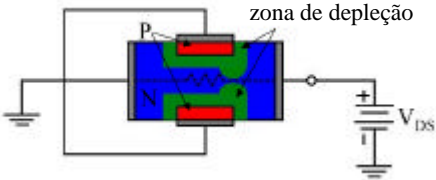


A zona de depleção reduz o tamanho efetivo do canal dopado por N e, dessa forma aumenta a resistência aparente do canal. Modulando-se o dreno para potencial de porta, o campo elétrico na zona de depleção entre a porta e o dreno varia e, conseqüentemente, o tamanho da zona de depleção varia.

Assim como ocorre com todas as junções PN, há uma zona de depleção ao redor da porta. Essa zona de depleção obviamente reduz a área transversal do canal do tipo n que está disponível para condução elétrica.

A ação do JFET é regida variando-se a porta para potencial de dreno e, dessa forma, modificando-se o tamanho da zona de depleção.

**Operação FET básica N° 4**



Aqui, a tensão de dreno para fonte,  $V_{DS}$ , é igual à tensão dreno para porta. À medida que  $V_{DS}$  aumenta, as zonas de depleção se movem juntas; e a resistência de fonte aumenta.

6.071 Transistores de Efeito de Campo 6

Um exemplo simples é conectar à terra a tensão do porta para a fonte, de forma que a tensão do dreno para a porta seja igual à tensão do dreno para a fonte. À medida que a tensão do dreno para a porta aumenta, a zona de depleção aumenta e, dessa forma, a condução do canal diminui.

Para pequenas tensões, a resistência aumenta com a tensão, e isso é descrito como a região ôhmica.

Acima da tensão obstruída o canal é saturado, e a resistência se torna constante. A tensão obstruída pode ser descrita como a tensão na qual as zonas de depleção das duas portas se encontram.

**Operação FET básica N° 5**

Defina uma resistência aparente através do FET, a resistência de canal  $R_C$ .

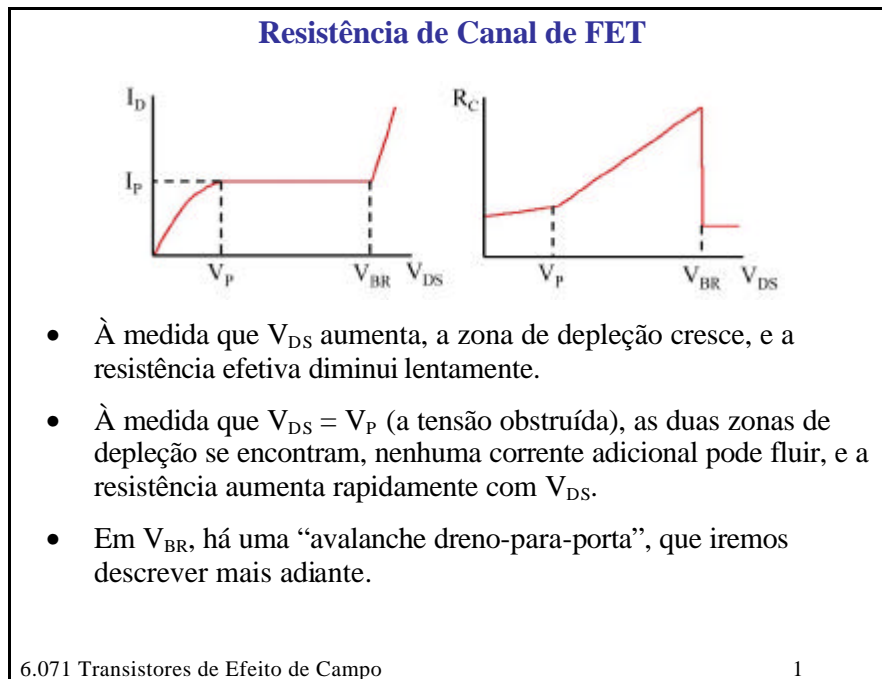
The diagram shows a cross-section of an N-channel FET with a blue channel and red gates. The gate is connected to ground. The drain is connected to a positive supply  $V_{DS}$ , and the source is connected to ground. The drain current  $I_D$  is shown flowing out of the drain. To the left, a graph plots  $I_D$  on the vertical axis and  $V_{DS}$  on the horizontal axis. A straight line passes through the origin, and a point on this line is marked with a dot. A vertical dashed line from this point to the horizontal axis is labeled  $V_{DS}$ , and a horizontal dashed line to the vertical axis is labeled  $I_D$ . The slope of the line is indicated by the equation  $R_C = \frac{V}{I}$ .

6.071 Transistores de Efeito de Campo 7

Iremos caracterizar o dispositivo pela resistência efetiva da junção. Agora, obviamente, a medida típica para caracterizar um transistor é medir a corrente de dreno como uma função da tensão dreno-fonte para um conjunto de correntes (ou tensões) aplicadas à porta.

Lembre-se de que é exatamente assim que executamos os testes com o BJT.

Depois que medirmos a corrente de dreno como uma função da tensão dreno-fonte, temos as informações para calcular uma resistência CC efetiva para esse ponto de operação.



À esquerda encontra-se a corrente de dreno vs a tensão de dreno para fonte para um porta ligado à terra.

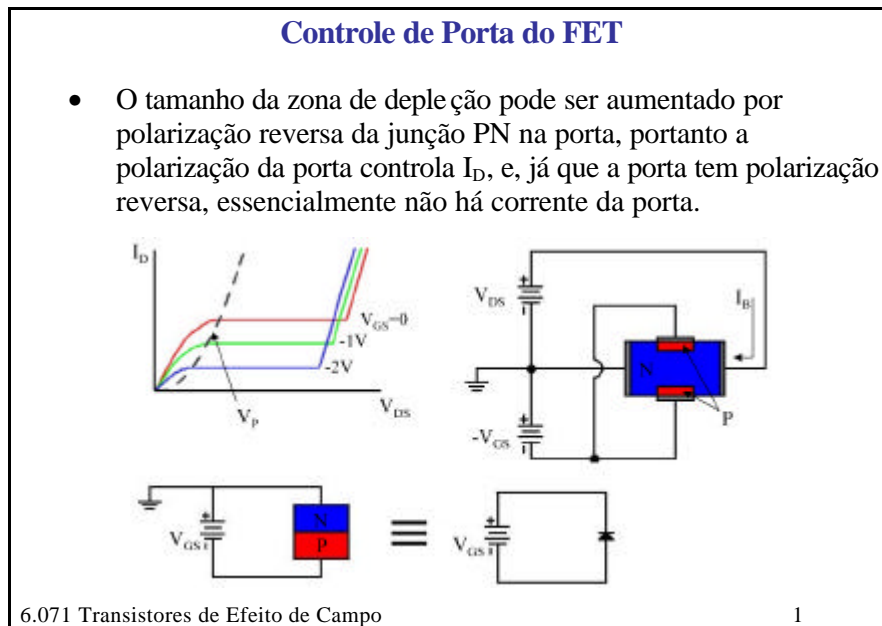
A região de tensão zero para a tensão obstruída é a região ôhmica, a região plana é a área de saturação e, em tensões mais altas, há uma região de ruptura, onde a condução do canal aumenta rapidamente. Muitos dispositivos serão destruídos se operados nessa região de ruptura, embora (assim como com os diodos zeners) existam dispositivos que são projetados para funcionar nessa região de avalanche.

O gráfico à direita mostra a resistência correspondente. Na região ôhmica, a resistência aumenta apenas lentamente e, em seguida, na região de saturação, a resistência aumenta mais rapidamente.

É importante observar que a corrente de dreno do JFET é independente da tensão dreno-fonte na região de saturação. Como iremos ver brevemente, nessa região a corrente de dreno permanece muito sensível ao potencial dreno-porta.

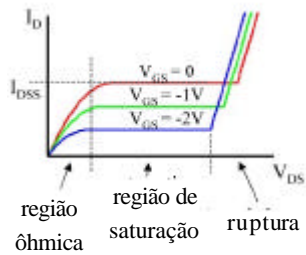
Portanto, se quisermos obter controle via porta, normalmente iremos projetar o dispositivo para operar na região de saturação. Se, contudo, estivermos buscando controle baseado na tensão do dreno, então o dispositivo será posicionado na região ôhmica.





Aqui, mostramos a variação da curva IV como uma função da tensão da porta. Lembre-se de que, na obstrução, as zonas de depleção das duas portas se encontraram, e, portanto, à medida que a tensão da porta muda, esse de operação, se move. É mais comum polarizar a porta de forma reversa (como mostrado no circuito), aumentando assim o campo ao longo da função PN e, de forma correspondente, aumentando o tamanho da zona de depleção para uma tensão constante de dreno-fonte. Observe que, à medida que a porta sofre polarização reversa, [FALTA TEXTO!]

### Especificação JFET



região ôhmica – JFET atua como um resistor variável.

região de saturação – JFET é independente da tensão de fonte-dreno, mas fortemente dependente da tensão da porta.

$V_{OFF,GS}$  = tensão de corte, tensão porta-fonte, onde JFET atua como um circuito aberto.

$BV_{DS}$  = tensão dreno-fonte, que leva a uma ruptura de corrente do canal JFET.

$I_{DS}$  = corrente de dreno para polarização de porta zero.

**Desempenho do JFET**

$$I_D = I_{DSS} \left[ -2 \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS,OFF}} \right) \frac{V_{DS}}{V_{GS,OFF}} - \left( \frac{V_{DS}}{V_{GS,OFF}} \right)^2 \right] \quad \begin{array}{l} \text{região} \\ \text{ôhmica} \end{array}$$

$$= I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS,OFF}} \right)^2 \quad \begin{array}{l} \text{região de} \\ \text{saturação} \end{array}$$

Alguns valores típicos:

$$I_{DSS} \sim 1 \text{ mA} \rightarrow 1 \text{ A}$$

$$V_{GS,OFF} \sim -0.5 \text{ V} \rightarrow -10 \text{ V}$$

$$BV_{DS} \sim 6 \text{ V} \rightarrow 50 \text{ V}$$

6.071 Transistores de Efeito de Campo 11

O projeto de circuitos JFET normalmente é realizado com equações relativamente simples para a corrente de dreno em termos de parâmetros de dispositivos e condições operacionais. Estes, é claro, dependem se o ponto de operação está na região ôhmica ou de saturação.

Já que o desempenho do dispositivo não deve depender criticamente dos parâmetros de circuito, alguns atalhos simplificadores normalmente são adotados e, no final, o circuito é avaliado com um pacote de simulação. Ajuda muito ser capaz de romper um projeto em suas partes funcionais e, então ver como cada uma deve operar. Isso, é claro, exige prática, e irá conduzir você através do processo.

### Transcondutância

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS}}$$

taxa de mudança da corrente de dreno com uma mudança da polarização da porta

A transcondutância é útil para o modo de um JFET como um resistor controlado por tensão, e tem unidades de (1/resistência), mhos.

$$g_m = \left. \frac{1}{R_{DS}} \right|_{V_{DS}} = g_{m_0} \sqrt{\left. \frac{I_D}{I_{DSS}} \right|_{V_{DS}}}$$

$$g_{m_0} = -\frac{2I_{DSS}}{V_{GS,OFF}} \equiv \text{transcondutância de uma porta com curto-circuito.}$$

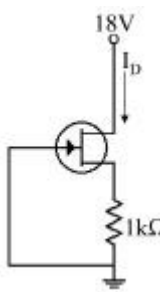
Uma característica importante, mas que não é fácil de entender, de um dispositivo de três parâmetros é a transcondutância, gm. Lembre-se de que estamos modelando o FET como um resistor controlado por tensão e, portanto, a corrente de dreno é uma função da tensão da porta para a fonte. Isso, é claro, é observado nos gráficos IV do FET para a região de saturação. A transcondutância é a razão da corrente de dreno com uma mudança na tensão a uma tensão dreno-fonte constante.

As unidades de transcondutância são ohms inversos (mhos).

Geralmente, as folhas de dados reportam as duas transcondutâncias para uma porta com curto-circuito.

Normalmente, na análise de circuitos FET, as propriedades de circuito podem ser reduzidas para uma função da transcondutância.

**Exemplo de JFET**



Encontre  $I_D$

$I_{DSS} = 8\text{mA}$ ,  $V_{GS,OFF} = -4\text{V}$

Já que  $V_{DS}$  parece ser maior que alguns volts e menos que a tensão de ruptura, assumiremos que o JFET é a região de saturação.

$$\therefore I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS,OFF}} \right)^2 = 8\text{mA} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{-4\text{V}} \right)^2$$

Observe que a tensão da porta é zero e, portanto, a tensão porta-fonte é menos a tensão da fonte.

$$V_{GS} = V_G - V_S = -V_S = -I_D \cdot 1\text{k}\Omega$$

$$\therefore I_D = -V_{GS} / 1\text{k}\Omega$$

6.071 Transistores de Efeito de Campo 1

Aqui, exploramos um exemplo simples de uma fonte de corrente derivada JFET. A porta sofre curto-circuito para ser ligado à terra (observe que não sofre curto-circuito para a fonte). O resistor de fonte introduz uma tensão de fonte e, dessa forma, há uma tensão porta-fonte negativa.

Encontremos a corrente de dreno como uma função de resistor de fonte.

A tensão de dreno é grande o suficiente para que possamos assumir que o dispositivo está funcionando na região de saturação. Portanto, podemos anotar imediatamente a corrente de dreno como uma função da tensão porta-fonte.

A tensão porta-fonte é simplesmente subtraída da tensão de fonte, e a tensão de fonte é a queda de tensão da corrente de dreno através do resistor de fonte.

**Exemplo de JFET (cont.)**

Então, substituindo na equação acima:

$$\therefore I_D = \frac{-V_{GS}}{1k\Omega} = 8mA \left(1 - \frac{V_{GS}}{-4V}\right)^2$$

Essa equação tem soluções de  $V_{GS} = -2V$  e  $-8V$ .

Observe que  $V_{GS,OFF} = -4V$   $\therefore$  a única gama válida de  $V_{GS}$  é  $0 \rightarrow -4V$

Se  $V_{GS} = -2V$ , então  $I_D = 2mA$

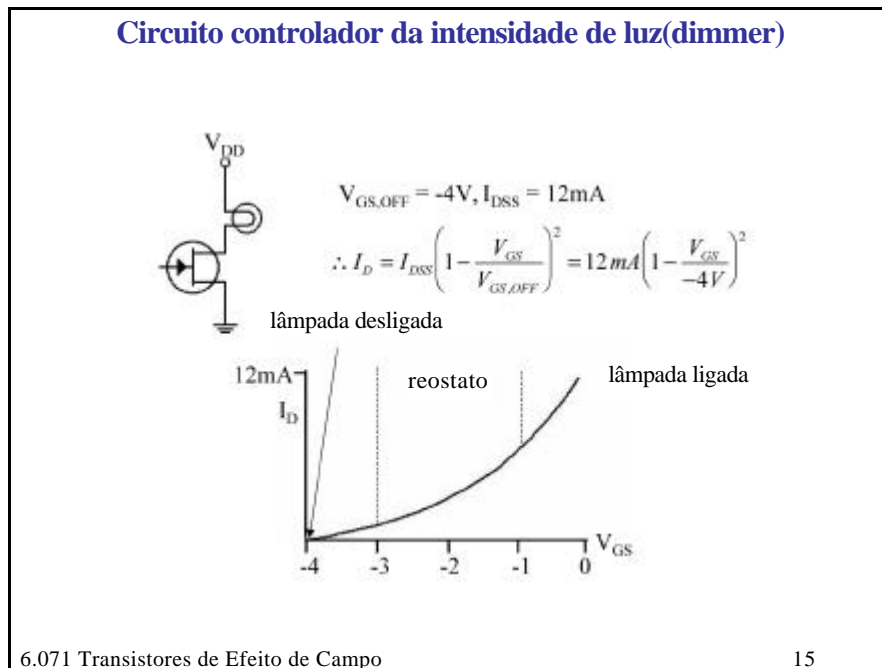
$V_S = 2V$ ,  $R_{JFET} = 16V/2mA = 8k\Omega$

$V_{DS} = 16V$

Configuramos as duas equações de forma igual e terminamos com uma equação quadrática para a corrente de dreno.

Já que o JFET desliga a  $-4V$ , a solução de  $-8V$  não é física, e escolhemos a solução de  $-2V$ , fornecendo uma corrente de dreno de  $2mA$ .

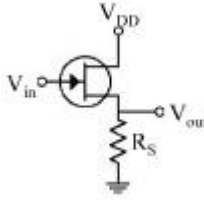
A partir disso, podemos calcular também a resistência dreno-fonte do dispositivo e a queda de tensão através do FET.



Um segundo exemplo de uma aplicação JFET é um resistor controlado por tensão. Aqui, vemos a variação da queda de tensão através do FET para controlar o brilho da lâmpada (o brilho é uma função não-linear da corrente através da lâmpada). Quando a porta sofre curto-circuito para a fonte, a corrente de dreno é alta, e a lâmpada se acende. À medida que a porta é negativamente polarizada, então a corrente de dreno é reduzida, e a lâmpada fica mais fraca. Isso continua até que ela esteja essencialmente desligada.

Você deve combinar esse circuito com o circuito anterior para fazer um reostato de lâmpada que funcione via um resistor variável, mas, em geral, é conveniente ter um dispositivo que seja controlado por tensão.

### Seguidor de Fonte



Análogo ao amplificador de seguidor de emissor bipolar. Não fornece nenhum ganho de tensão, mas fornece uma mudança de impedância, fornecendo portanto um ganho de corrente.

Onde  $R_S < R_{CARGA}$ , então  $V_S \approx R_S I_D$

$$I_D = g_M V_{GS} = g_M (V_{in} - V_S)$$

$$\therefore \frac{V_S}{R_S} = g_M (V_{in} - V_S) \quad \text{or} \quad V_S = \frac{g_M R_S V_{in}}{(1 + g_M R_S)}$$

Observe que  $V_{SAÍDA} = V_S$ , o ganho é  $\frac{g_M R_S}{(1 + g_M R_S)}$

6.071 Transistores de Efeito de Campo
16

O seguidor de fonte JFET é, do ponto de vista funcional, semelhante ao emissor de seguidor de BJT. Ele também não oferece ganho de tensão, mas fornece uma mudança de impedância e, dessa forma, um ganho de corrente (e potência).

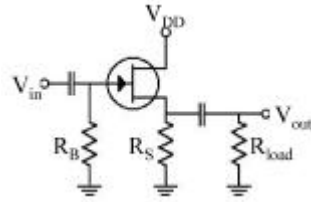
Ainda usamos boas práticas de projeto, então, considerando o seguidor de fonte como uma fonte de tensão, vemos que o resistor de fonte é muito menor que o resistor de carga e, dessa forma, podemos ignorar a carga em nossa análise.

A queda de tensão através do resistor de fonte e, assim, a resistência de fonte vezes a corrente de dreno. Podemos relacionar a corrente de dreno para a tensão porta-fonte via transcondutância. E vemos que a tensão de fonte também é a tensão de saída.

Observe que, normalmente, a transcondutância corresponde a um resistor menor (de cerca de 200 ohms) que o resistor de fonte e, assim, o ganho é cerca de 1.



### Amplificador Seguidor de Fonte

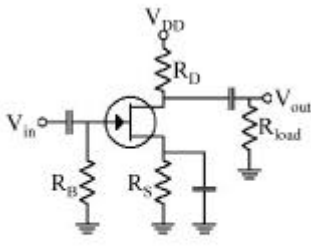


$$\text{ganho} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_S}{R_S + 1/g_m}; \quad R_B \text{ configura a polarização do JFET}$$

Os capacitores são usados para filtragem.

Uma configuração comum de amplificador seguidor de fonte. Se nos ativermos ao essencial, os capacitores servem para remover CC, o resistor da porta serve para polarização, e o resistor de carga pode ser ignorado em função da resistência de fonte. Portanto, observamos o mesmo ganho.

**Amplificador Fonte Comum**



*Ganho* 
$$= \frac{V_{out}}{V_{in}} = -g_m \frac{R_D R_{load}}{R_D + R_B}$$

6.071 Transistores de Efeito de Campo18

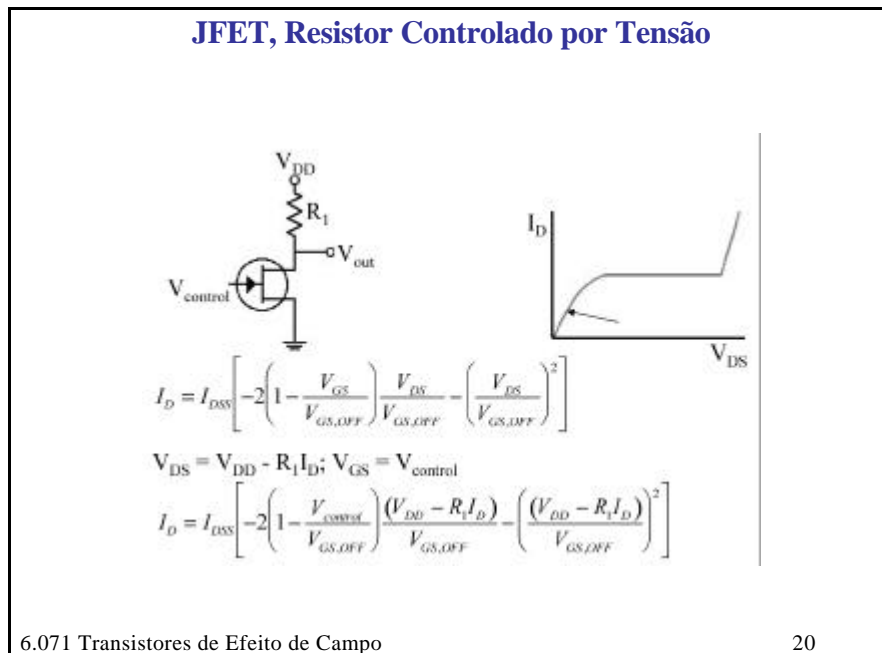
Um amplificador com ganho é a configuração de fonte comum; aqui, a tensão é dividida ao longo de um resistor de dreno, do FET e de um resistor de fonte. O resistor de fonte configura apenas o ponto de operação CC, observe que ele é desviado por um capacitor e, portanto, para altas frequências, o resistor de fonte não está no circuito.

### Quando Usar JFETs

- O JFET possui impedâncias de entrada muito mais altas e correntes de entrada muito mais baixas que o BJT.
- Os BJTs são mais lineares que os JFETs.
- O ganho de um BJT é muito mais alto que o de um JFET.

Em geral, os JFETs são usados apenas nos casos em que um BJT não iria funcionar de forma conveniente, como quando a corrente de fuga para a base de um BJT é muito alta.

Para aplicações de lógica digital, o uso de FETs tem sido importante, já que eles podem ser muito mais rápidos e dissipar menos potência. A maioria dessas aplicações, contudo, usa MOSFETs, que possuem impedâncias de entrada ainda maiores que os JFETs.



Ocasionalmente, é mais conveniente operar na região ôhmica que na região de saturação. A análise não muda de forma alguma, mas as equações ficam um pouco mais complicadas. Aqui, calculamos o comportamento de um JFET usado como um resistor controlado por tensão. Conforme o esperado, terminamos com uma função quadrática novamente.

### JFET, Resistor Controlado por Tensão (cont.)

$$\begin{aligned} \therefore \left( \frac{R_1^2 I_{DSS}}{V_{GS,OFF}^2} \right) I_D^2 + \left[ 1 - \frac{2R_1 I_{DSS}}{V_{GS,OFF}} \left( 1 - \frac{(V_{control} - V_{DD})}{V_{GS,OFF}} \right) \right] I_D \\ = -I_{DSS} \left[ \frac{2V_{DD}}{V_{GS,OFF}} \left( 1 - \frac{V_{control}}{V_{GS,OFF}} \right) + \frac{V_{DD}^2}{V_{GS,OFF}^2} \right] \end{aligned}$$

Para  $I_{DSS} = 12\text{mA}$ ,  $V_{GS,OFF} = -5\text{V}$ ,  
 $V_{DD} = 10\text{V}$ ,  $R_1 = 2\text{k}\Omega$ :

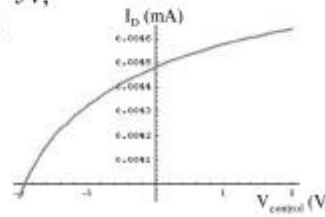


Gráfico produzido com Mathematica™

A curva foi desenhada com Mathematica para mostrar a variação na corrente de dreno com a tensão de entrada. Isso pode ser um meio útil de fornecer uma configuração precisa e controlável.

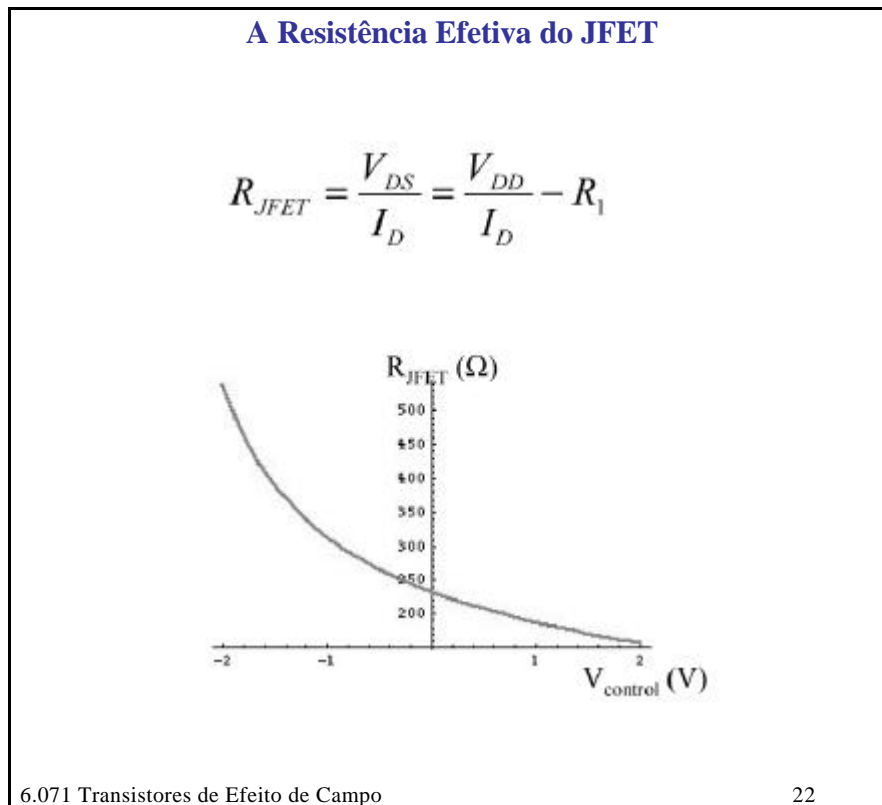
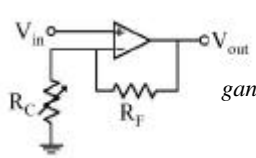


Gráfico produzido com Mathematica™

Dada a variação de corrente, é um processo simples o suficiente para ser relatado como uma resistência, novamente via Mathematica. Observe que, na região ôhmica, podemos permitir que a tensão porta-fonte seja positiva.

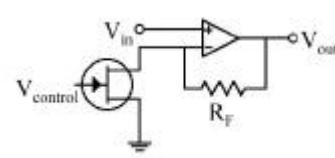
Normalmente é aconselhável, em qualquer aplicação, calcular também a potência dissipada no FET, que, é claro, será uma função da tensão de controle. Aqui, obviamente, a potência máxima é dissipada quando a resistência do FET é igual ao resistor de dreno.

**Controle Eletrônico de ganho**



$$\text{ganho} = \frac{R_C + R_F}{R_C}$$

∴ Podemos atingir um controle eletrônico substituindo o resistor de controle por um JFET:



6.071 Transistores de Efeito de Campo
23

Veremos, na próxima apresentação, que amplificadores operacionais fornecem amplificadores diferenciais convenientes, e que seu ganho é controlado pelos resistores de realimentação. Um JFET oferece um resistor controlado por tensão bastante conveniente e, dessa forma, um ganho controlado por tensão.

**Dependência de Frequência de  $Y_{fs}$**

lembre-se  $y_{fs} = \left. \frac{\Delta I}{\Delta V_{GS}} \right|_{V_{DS}}$

$V_{in} = V_{GS} ; I_d = y_{fs} \cdot V_{in}$

$V_{DS} = V_{DD} - I_d \cdot R_L ; V_{DS} = V_{DD} - y_{fs} \cdot V_{in} \cdot R_L$

$V_{out} \equiv \text{AC part of } V_{DS} = y_{fs} \cdot V_{in} \cdot R_L$

6.071 Transistores de Efeito de Campo 24

Aqui está um circuito de teste para medir a dependência de frequência da transcondutância (aqui,  $y_{fs}$  normalmente é relatado para altas frequências). O resistor de porta com alto valor serve apenas para estabilidade.



**Símbolos do JFET**

porta

dreno

fonte

porta

dreno

fonte

- Normalmente, as áreas de porta são dopadas em graus diferentes, levando às especificações de dreno/fonte.
- Para alguns dispositivos, o dreno e a fonte são intercambiáveis.
- Ocasionalmente, as duas portas não são interconectados, levando a um dispositivo de quatro terminais.

6.071 Transistores de Efeito de Campo 25

Assim como com os BJTs, existem tanto JFETs do tipo npn quanto pnp; os NPNs normalmente são chamados de canal n, para evitar qualquer confusão com a configuração do porta.

O dreno e a fonte podem ser intercambiáveis, ou não-dependentes de seus níveis relativos de aditivo.

17 26-28

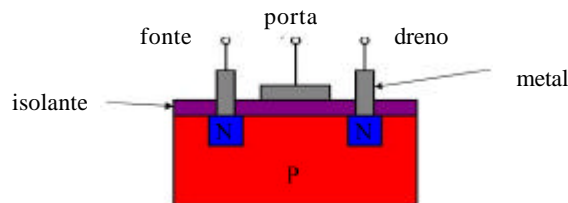
Entre no site do fabricante para obter um manual dos produtos. Favor seguir estas etapas:


1. Vá para o site de Fairchild Semiconductor: <http://www.fairchildsemi.com/>
2. Veja as condições de uso do site, visitando o link “Site Terms and Conditions” da página inicial, ou entrando neste link:  
<http://www.fairchildsemi.com/legal/index.html>
3. Volte à página inicial.
4. Na caixa de busca, digite o número do produto 2N5457, selecione “Product Folders and Datasheets” e clique em “go”. Você procura o manual para Adaptador Multi-Propósito de Canal N (*N-Channel General Purpose Adapter*).
5. Várias opções serão apresentadas a você (por exemplo, download PDF ou email). Selecione o meio pelo qual você gostaria de receber o manual.

### MOSFET N°1

Transistores de efeito de campo de semicondutores de óxido de metal são bem diferentes dos JFETs, e vêm em um conjunto potencialmente confuso de variedades.

A característica definidora é que a porta é acoplada capacitivamente.



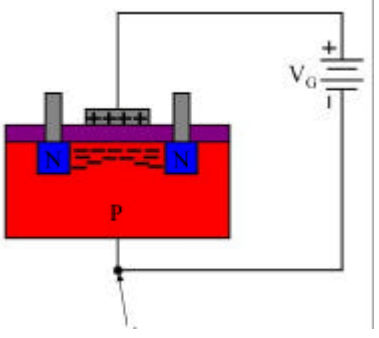
modo de aumento, MOSFET npn  
 ausência de campo de porta   
 $\therefore$  corrente de fuga bastante baixa

Atualmente, os MOSFETs são mais comuns que os JFETs, mas existe também uma gama confusa deles, que não dá para ser coberta em detalhes. A etapa básica inteligente foi perceber que, se nos importássemos apenas com o campo elétrico da porta para o dreno, então não haveria necessidade de uma conexão galvânica, e uma conexão capacitiva também funcionaria. Portanto, no MOSFET, há uma camada de isolante (vidro) entre o conector de porta e o semicondutor dopado com p.

Observe que, na ausência de uma tensão de porta, o semicondutor é disposto de forma tal que haja uma junção NPN entre o dreno e a fonte, e, portanto, isso se assemelha a dois diodos costas-a-costas (“*back-to-back*”) e, conseqüentemente, há uma corrente dreno para fonte bastante baixa. Compare isso com o BJT (onde a região de porta é pequena), e o JFET (onde o dreno e a fonte formam um canal condutor).

**MOSFET de Modo de Aumento**

Uma tensão de substrato de porta positiva induz uma carga negativa entre a fonte e o dreno e cria um canal do tipo n. A corrente agora pode fluir.

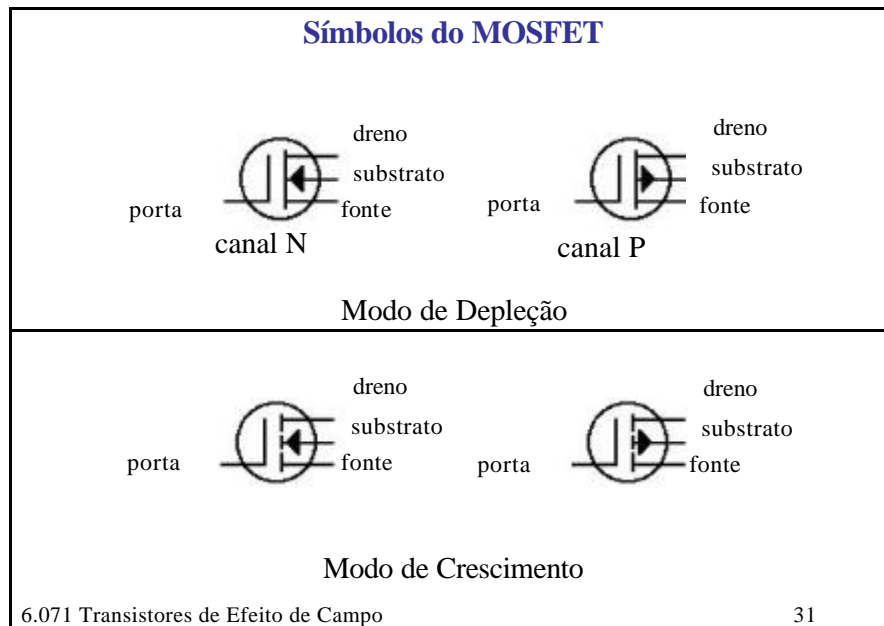


conector de substrato

6.071 Transistores de Efeito de Campo 30

Ao explorarmos a ação de um MOSFET, começamos observando a junção capacitiva da porta e perguntamos qual será a distribuição de carga no semiconductor para vários potenciais de porta. Observe que agora estamos interessados em uma diferença potencial entre o eletrodo da porta e o substrato (neste momento, não invocamos a fonte nem o dreno). Se a porta para o substrato recebe carga positiva, então iremos concentrar elétrons entre os canais de tipo n da fonte e do dreno e a corrente poderá fluir. Esses são, obviamente, portadores majoritários nas regiões de fonte e dreno portadores minoritária na região de porta (mas nós os concentramos).

Esse é o mecanismo de condução normal para o chamado MOSFET de modo de aumento.



Além dos MOSFETs de modo de crescimento, há também dispositivos de modo de depleção. Os vários símbolos são apresentados acima. Ao usar esses dispositivos, é importante ficar atento à conexão de substrato, já que ela forma o segundo terminal do capacitor de porta.

**MOSFET de Modo de Depleção**

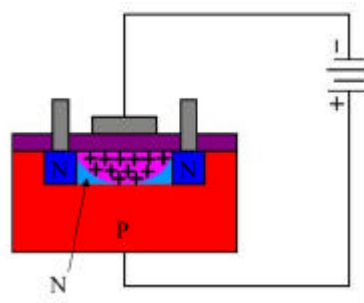
As regiões de fonte e dreno são mais fortemente dopadas que o canal, mas a uma polarização zero de porta, não há corrente.

6.071 Transistores de Efeito de Campo 32

Em dispositivos de modo de depleção, o segundo lado do capacitor de porta é uma pequena região de material do tipo n. Agora, sem polarização de porta, há um canal do tipo n do dreno para a porta, e flui uma corrente. Essa região de porta é levemente dopada, e o campo elétrico no capacitor de porta é usado para manipular as concentrações de portador nessa região e obter controle da corrente dreno-fonte.

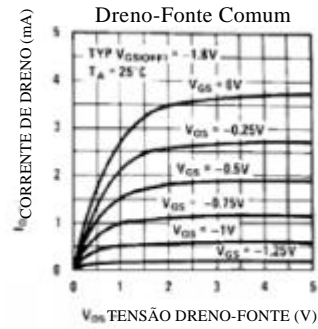
### MOSFET de Modo de Depleção N°2

Uma tensão negativa entre a porta e o substrato induz um canal do tipo p na região de porta dopada com n e desliga a corrente fonte-dreno.



Uma polarização negativa através do capacitor de substrato de porta puxa lacunas do material do tipo p para o canal de condução e reduz a corrente dreno-fonte. Nessa operação, o dispositivo se assemelha a um JFET, onde um potencial de porta negativo retarda a corrente de dreno.

### MOSFET de Modo de Depleção, Canal N



Tensão de corte,  $V_{GS,OFF}$  – tensão porta/fonte, onde  $I_D \approx 0$ .

Tensão de ruptura,  $BV_{DS}$  – tensão dreno/fonte para ruptura de corrente do canal.

Corrente de dreno para polarização zero,  $I_{DSS}$  –

Transcondutância,  $g_m$  – taxa de mudança de corrente de dreno com a mudança de tensão porta/fonte a uma tensão porta/fonte em particular.

O gráfico IV para um manual de MOSFET de modo de depleção; os outros parâmetros são sempre fornecidos no manual.



### Fórmulas: MOSFET de Modo de Depleção

$$I_D = I_{DSS} \left[ -2 \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS,OFF}} \right) \frac{V_{DS}}{V_{GS,OFF}} - \left( \frac{V_{DS}}{V_{GS,OFF}} \right)^2 \right]$$

Em ôhmica

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS,OFF}} \right)^2$$

Em ativa

$$R_{DS} = \frac{1}{g_m}; \text{ Resistência dreno-fonte}$$

$$g_m = g_{m_0} \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}}; g_{m_0} = \frac{2I_{DSS}}{V_{GS,OFF}}$$

Assim como ocorre com os JFETs, há uma série de fórmulas relacionando a corrente de dreno ao dispositivo e parâmetros de circuito. Estes são usados exatamente com os dos JFETs.

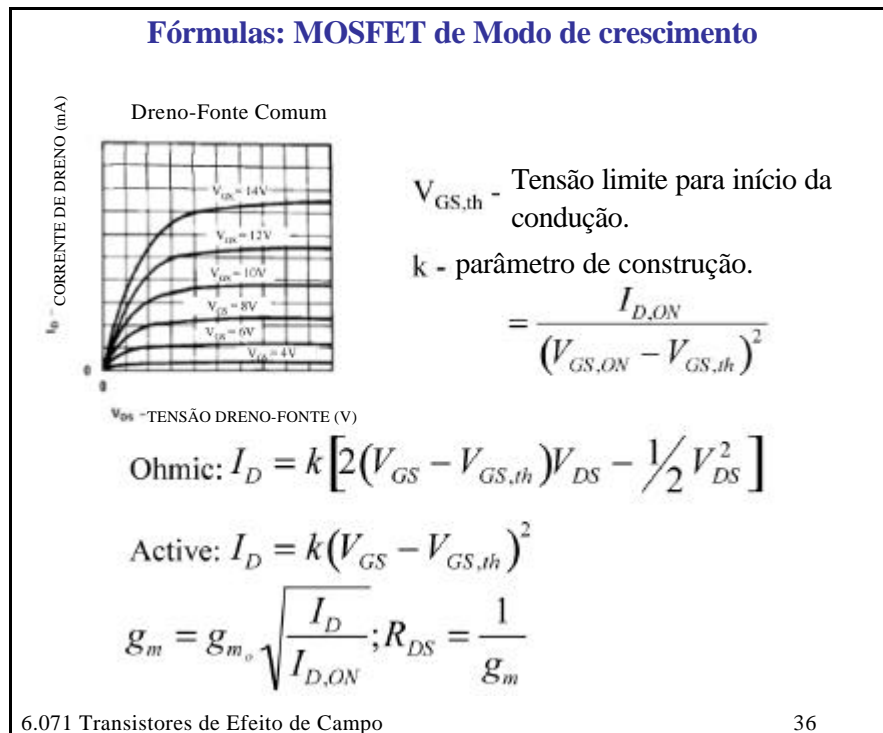


Gráfico produzido com Mathematica™

As fórmulas para o modo de crescimento são bastante semelhantes, mas incluem o chamado parâmetro de construção que descreve a capacidade do canal. Isso normalmente é listado de forma explícita no manual, então não é necessário fazer o cálculo.

### Características de Transferência de Três Tipos de FET

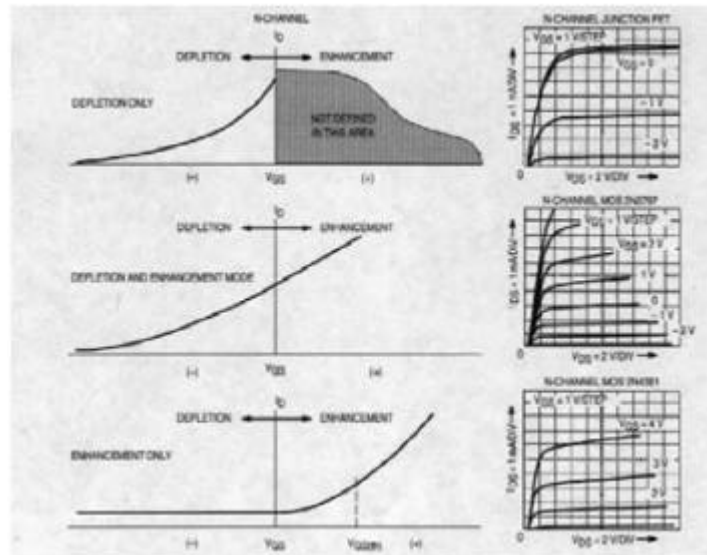
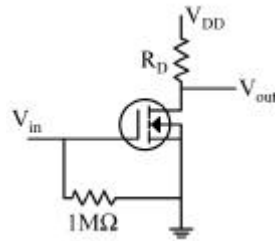


Gráfico produzido com Mathematica™

Aqui, mostramos as características de transferência de três tipos de MOSFET, (1) depleção, (2) crescimento e (3) ambos. Os gráficos IV à direita mostram a corrente de dreno vs tensão de fonte de dreno para vários potenciais de porta. Isso é o que normalmente é encontrado nas folhas de dados. As curvas à esquerda mostram como a corrente de dreno varia como uma função do potencial de porta na região ativa. Isso normalmente não é mostrado, mas é uma boa forma de visualizar as diferenças entre os três tipos de dispositivo. Também ajuda a ver se os pontos de operação devem ser configurados.

**Exemplo: Amplificadores MOSFET de Modo de Depleção, Canal N**



Características do MOSFET:

$$I_{DSS} = 10\text{mA}$$

$$V_{GS,OFF} = -4\text{V}$$

$$V_{DD} = 4\text{V}$$

$$R_D = 200\Omega$$

O problema é encontrar o ganho.

A ação do MOSFET é ser um divisor de tensão e compartilhar  $V_{DD}$  sobre  $R_D$  e  $R_{DS}$ .  $V_{ent}$  irá controlar o valor de  $R_{DS}$ . O resistor  $1\text{M}\Omega$  é incluído apenas para estabilidade e para corrigir corrente de fuga nas portas; portanto, vamos ignorá-lo.

Como exemplo, vemos o ponto de operação de um amplificador MOSFET de modo de depleção. O FET e o resistor de dreno compartilham a tensão e, à medida que a porta sofre polarização reversa, o FET é temporariamente desativado e a tensão cresce através do FET (a tensão de saída aumenta).

**Exemplo (continuação)**

Calcule o ganho nos arredores de  $V_{ent} = 0$ , então

$$I_D = I_{DSS} = 10\text{mA}$$

$$\text{e } V_{saída} = V_{DD} - I_D R_D = 4\text{V} - (10\text{mA})(200\Omega) = 2\text{V}$$

Para ver como isso muda com  $V_{ent}$ , calculemos a

Transcondutância a  $V_{ent} = 0$ .

$$g_m = \frac{2I_{DSS}}{V_{GS,OFF}} = \frac{20\text{mA}}{-4\text{V}} = 5 \times 10^{-3} \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

Lembre-se de que a transcondutância  $g_m = 1/R_{DS}$ .

$$\text{e } V_{saída} = \left( \frac{R_{DS}}{R_{DS} + R_D} \right) V_{DD}$$

Já que estamos procurando uma mudança de corrente (resistência) com a tensão de controle, precisamos pensar sobre a transcondutância, mas primeiro precisamos decidir sobre qual ponto calcular o ganho. Vejamos os arredores da tensão de entrada zero. Agora, a corrente de dreno pode ser retirada do manual e descobre-se que a tensão de saída é de 2V (convenientemente no meio). Também podemos calcular diretamente a transcondutância, que é de 200 mhos. Já que isso nos fornece a resistência de fonte de dreno, calculamos o ganho.

**Exemplo (continuação)**

A partir de nossas fórmulas,

$$g_m = g_{m_1} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS,OFF}} \right) = \frac{5 \times 10^{-3}}{\Omega} \left( 1 + \frac{V_{in}}{4V} \right)$$

Isso fornece a mudança em  $R_{DS}$  com uma mudança em  $V_{ent}$ . Agora, vamos supor que  $R_{DS}$  varie lentamente, de forma que  $\Delta R_{DS} \ll R_{DS} \approx R_D$ . Nesse caso,

$$V_{out} \approx 2V + \left( \frac{\Delta R_{DS}}{400\Omega} \right) \cdot 4V$$

e a mudança em  $V_{saída}$  com  $\Delta R_{DS}$  é

$$\Delta V_{out} = \frac{\Delta R_{DS}}{100}$$

A partir de  $g_m = 1/R_{DS}$ , encontramos  $R_{DS} = 200\Omega(1+V_{ent}/4)^{-1}$

Nesse caso, vamos assumir um pequeno sinal e buscar uma solução linear ao redor de tensão de entrada zero. Vamos fazer algumas suposições e descartar alguns termos para evitarmos um problema quadrático. Qualquer uma das formas funciona e, é claro, irá fornecer essencialmente a mesma resposta. Lembre-se de que todos os parâmetros de circuito variam.

Nós reescrevemos a tensão de saída para pequenas mudanças na resistência de fonte de dreno, e descobrimos que a tensão de saída varia lentamente com isso.

**Exemplo (continuação)**

$$\Delta R_{DS} = 200\Omega - \frac{200\Omega}{1 + \frac{V_{in}}{4}} = \frac{200\Omega \cdot V_{in}}{4 + V_{in}}$$

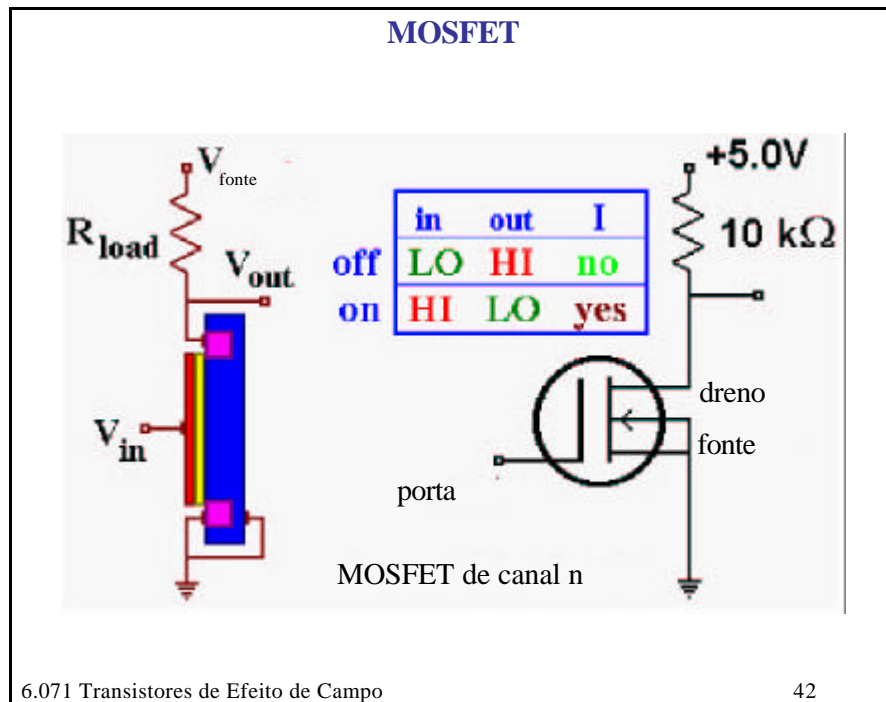
Mais uma vez, olhamos ao redor de  $V_{ent} \approx 0$ , portanto  $V_{ent} \ll 4$  e

$\Delta R_{DS} \approx 50\Omega \cdot V_{ent}$ , Juntando isso, então,

$$\Delta V_{out} \approx \frac{50\Omega}{100} V_{in} = \left(\frac{1}{2}\right) V_{in}$$

Portanto o ganho é de  $-1/2$ .

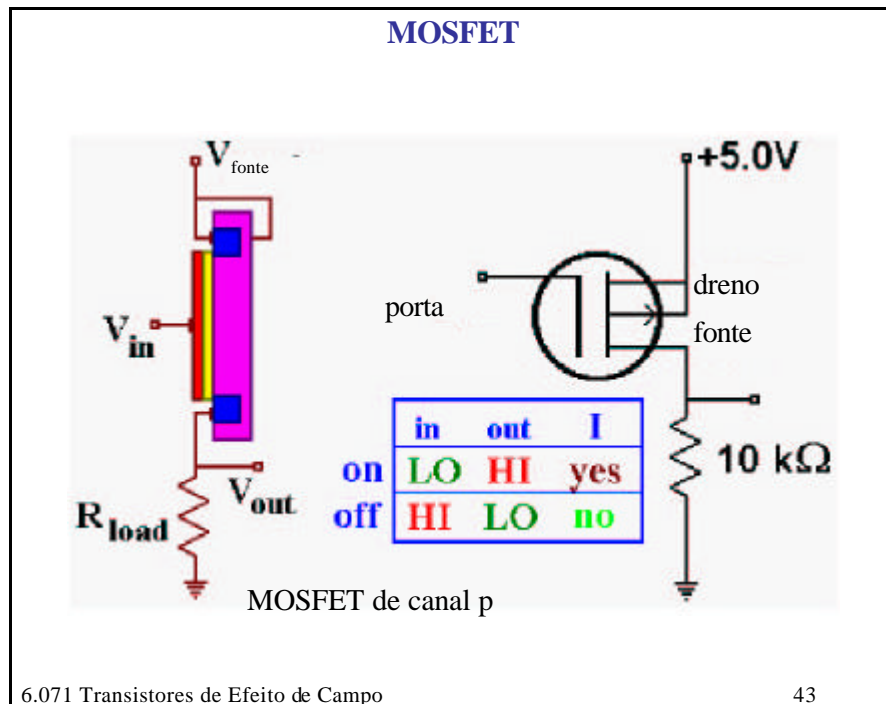
Expanda a resistência dreno-fonte em termos de tensão de saída e então use o fato de que a tensão de entrada é pequena para simplificar isso. O resultado é que o dispositivo é um atenuador (tem ganho de uma metade), e não um amplificador. Você deve reconhecer que, se aumentarmos a tensão (ou reduzirmos o resistor de dreno), podemos aumentar o ganho.



Uma das utilizações mais importantes de MOSFETs é construir circuitos lógicos que dissipem a menor potência. Se construirmos a configuração de MOSFET acima, veremos que, em uma configuração, há uma corrente na carga, mas não na outra.

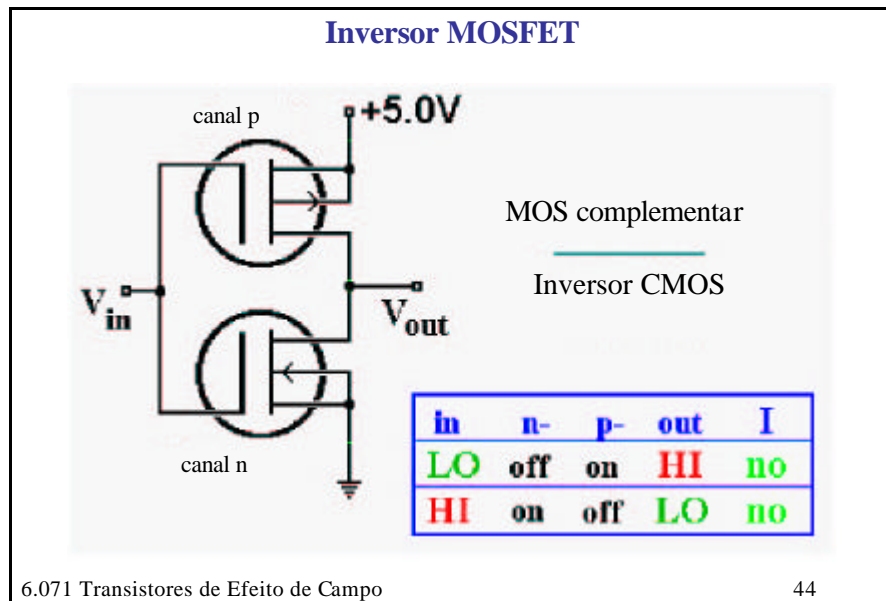
Observe que o substrato é ligado por terra à fonte.





Em um dispositivo de canal p, a corrente está associada ao estado ligado.

Aqui, observamos que o substrato ainda está ligado por terra à fonte (que agora está com uma tensão positiva).



Na lógica MOSFET complementar (CMOS), a mesma porta é construído a partir de uma combinação de dispositivos de canal p e n de forma tal que não haja fluxo de corrente em nenhum estado lógico. É claro que a ausência de corrente significa que não há dissipação de potência.