

Transistor de Efeito de Campo



UNIVERSIDADE
FEEVALE

Transistor de Efeito de Campo (FET)

- Disponível em dois tipos:
 - JFET
 - MOSFET (enriquecimento ou depleção)
- Disponível em duas polaridades:
 - canal n
 - canal p
- Possui 3 terminais: dreno (D), porta/gate (G) e fonte (S);
- Adequado para uso em CI (MOSFET);
- Possui alta impedância de entrada;
- Utilizado como amplificador ou chave analógica;
- Propriedades:
 - Tamanho: o MOSFET ocupa de 20 a 30% da área de um chip ocupada por um BJT;
 - Resistência controlada por tensão: ocupa menor área do que um resistor;
 - Alta resistência e pequena capacitância de entrada: utilizado como elemento de armazenamento em circuitos digitais;
 - Capacidade para dissipar alta potência e chavear grandes correntes em menos do que 1ns. Possibilitando seu uso em chaveamento de alta frequência e alta potência.



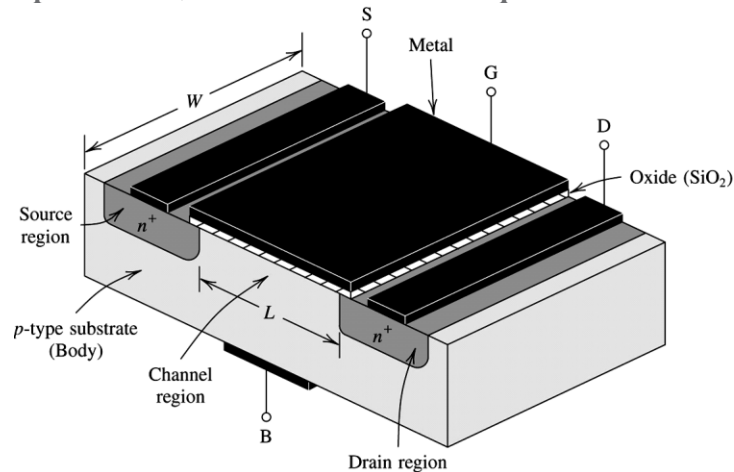
Transistor de Efeito de Campo (MOSFET)

MOSFET

- Apresenta baixa capacitância de entrada;
- Maior impedância de entrada, comparada com o JFET;
- Dois tipos: enriquecimento e o depleção.

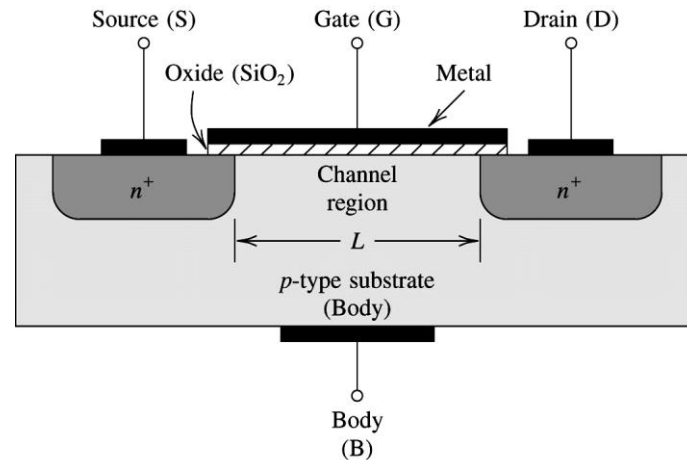
MOSFET – Tipo enriquecimento

Um MOSFET canal n consiste de um substrato tipo p onde duas regiões tipo n, fortemente dopadas, são difundidas. Estas duas regiões formam a fonte e o dreno. O canal não é fabricado neste dispositivo, ao contrário do que acontece no JFET.



Transistor de Efeito de Campo (MOSFET)

A porta (gate) é formada cobrindo a região entre o dreno e a fonte com uma camada de dióxido de silício, do qual em cima é colocada uma placa de metal, daí o nome MOSFET (Metal, Óxido e Semicondutor). Outro nome utilizado é IGFET (Insulated-Gate FET).



A região do canal tem um comprimento L e uma largura W , dois parâmetros importantes.

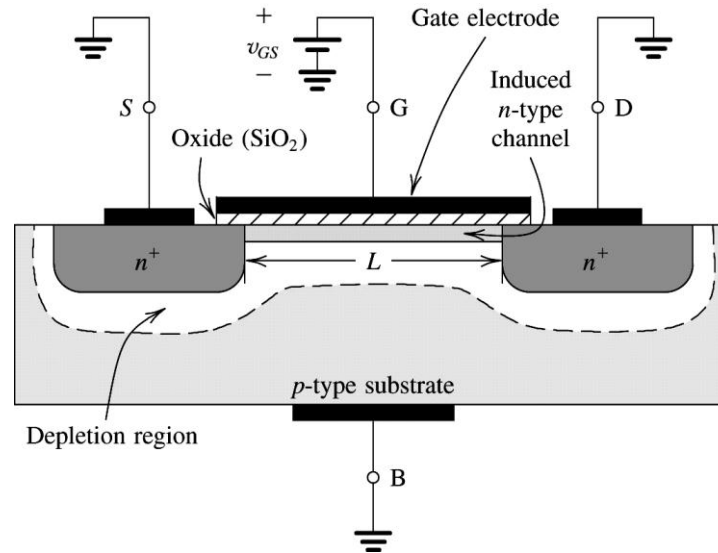
O caminho entre dreno e fonte tem uma resistência muito elevada ($10^{12}\Omega$), evitando, assim, a condução de corrente entre dreno e fonte quando V_{DS} é aplicado sem voltagem de porta (gate).

Este dispositivo opera com tensão $V_{GS} > 0$, daí o termo enriquecimento ou crescimento. Nesta situação ($V_{GS} > 0$), um canal tipo n é induzido, entre fonte e dreno, como resultado dos elétrons, da banda de condução, atraídos à superfície do substrato p, diretamente abaixo da porta (gate). O valor de V_{GS} na qual um número suficiente de elétrons móveis se acumulam na região do canal, para formá-lo, é chamada tensão de limiar (Threshold Voltage) e é denominada V_t .

Transistor de Efeito de Campo (MOSFET)

Criando um Canal de Condução

A figura abaixo mostra que a fonte e o dreno estão aterrados e uma tensão positiva é aplicada à porta.

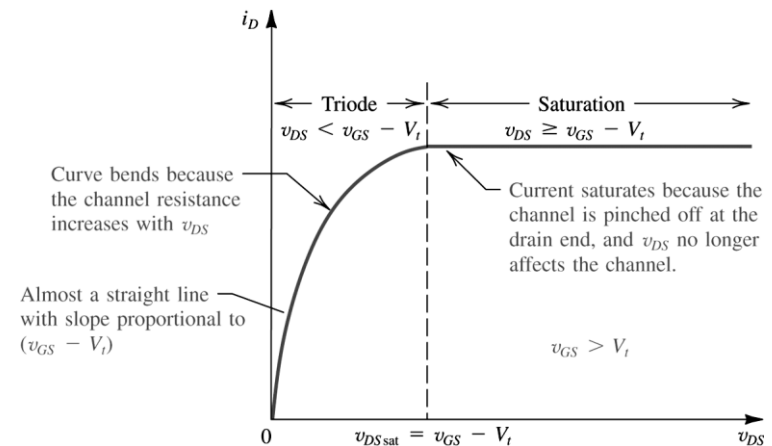
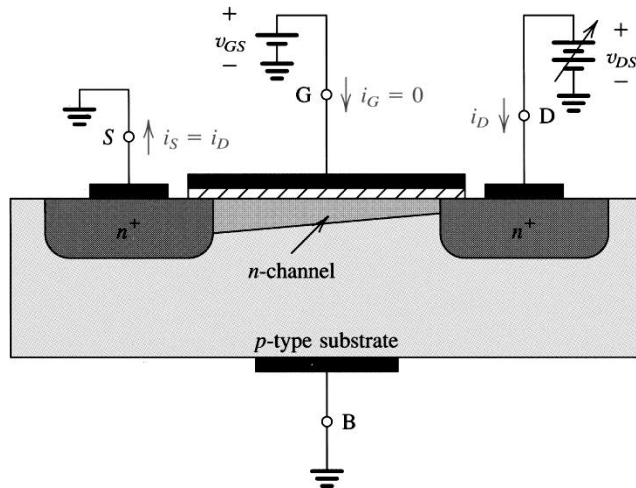


O valor de V_{GS} para o qual um número suficiente de elétrons móveis se acumulam na região do canal para formar um canal de condução é chamado de **tensão de limiar** (threshold) e é representado por V_t , que é positivo para um FET canal n .

Transistor de Efeito de Campo (MOSFET)

Operação com aumento de v_{DS}

Mantemos V_{GS} constante com um valor maior do que V_t . Portanto, a tensão entre a porta e os pontos ao longo do canal diminui de V_{GS} na fonte até $V_{GS} - V_{DS}$ no dreno. Com isso, o canal será mais profundo no final da fonte e mais superficial no final do dreno.



Quando V_{DS} aumenta até o valor que reduz a tensão entre a porta e o canal no final do dreno para V_t , isto é, $V_{GS} - V_{DS} = V_t$ ou $V_{DS} = V_{GS} - V_t$, a profundidade do canal no final do dreno diminui até próximo de zero e diz-se que o canal está **estrangulado** (pinched-off). A corrente de dreno se mantém constante e dizemos que o MOSFET inicia sua operação na **região de saturação**.

Para cada valor de $V_{GS} \geq V_t$, existe um correspondente valor de $V_{DSsat} = V_{GS} - V_t$.

Transistor de Efeito de Campo (MOSFET)

A tensão V_{DS} produz um campo elétrico ao longo do canal que faz com que a carga se desloque em direção ao dreno.

Regiões de operação

- Corte: $V_{GS} < \underline{V_t}$ e $I_D = 0$

- Triodo: $V_{GS} > \underline{V_t}$ e $V_{DS} \leq V_{GS} - V_t$

$$I_D = (\mu_n \cdot C_{ox}) \cdot \left(\frac{W}{L}\right) \cdot \left[(V_{GS} - V_t) \cdot V_{DS} - \frac{1}{2} \cdot (V_{DS})^2 \right]$$

$$r_{DS} \equiv \frac{V_{DS}}{I_D} = \left[(\mu_n \cdot C_{ox}) \cdot \left(\frac{W}{L}\right) \cdot (V_{GS} - V_t) \right]^{-1}$$

o valor de r_{DS} é controlado por V_{GS} .

- Saturação: $V_{GS} > \underline{V_t}$, $V_{GD} \leq V_t$ e $V_{DS} > V_{GS} - V_t$

$$I_D = \frac{1}{2} \cdot (\mu_n \cdot C_{ox}) \cdot \left(\frac{W}{L}\right) \cdot (V_{GS} - V_t)^2 \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS})$$

Limite entre a região triode e a saturação é dado por $V_{DS} = V_{GS} - \underline{V_t}$.

Para operar como chave, deve-se utilizar as regiões de corte e triode.

No PMOS deve-se observar que:

Vt e V_A são negativos;

Na região triode

$V_{GS} < \underline{V_t}$ e $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$

Na região de saturação

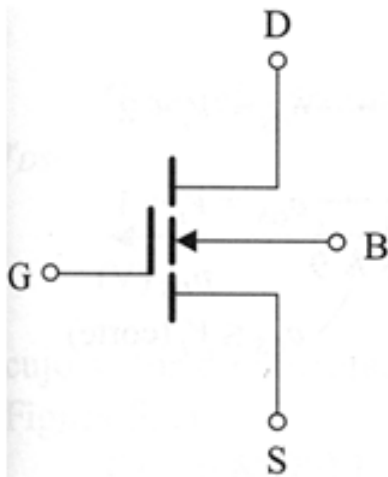
$V_{GS} < \underline{V_t}$ e $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$

Transistor de Efeito de Campo (MOSFET)

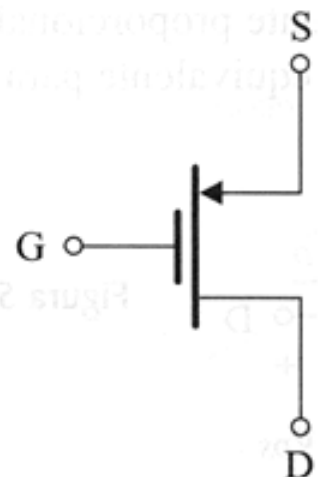
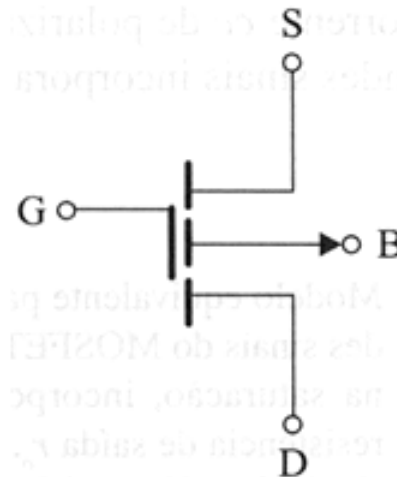
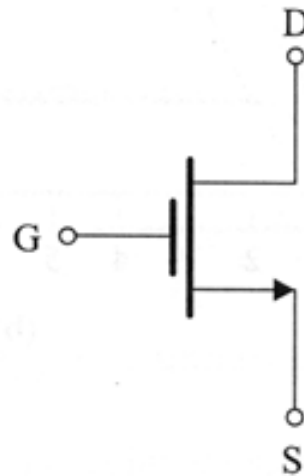
onde o termo $(\mu_n \cdot C_{ox})$ é conhecido como **parâmetro de transcondutância do processo**, e costuma ser indicado como k'_n para dispositivo canal n e k'_p para dispositivo canal p. O termo $(1 + \lambda \cdot V_{DS})$ representa a dependência linear de I_D com V_{DS} na região de saturação, sendo V_{GS} , V_t , $\lambda = 1/V_A$ e V_{DS} grandezas positivas para dispositivos canal n. Na maioria das vezes a modulação do canal poderá ser desconsiderada.

$|V_t|$ diminui cerca de 2 mV para cada 1°C de aumento na temperatura.

Símbolo



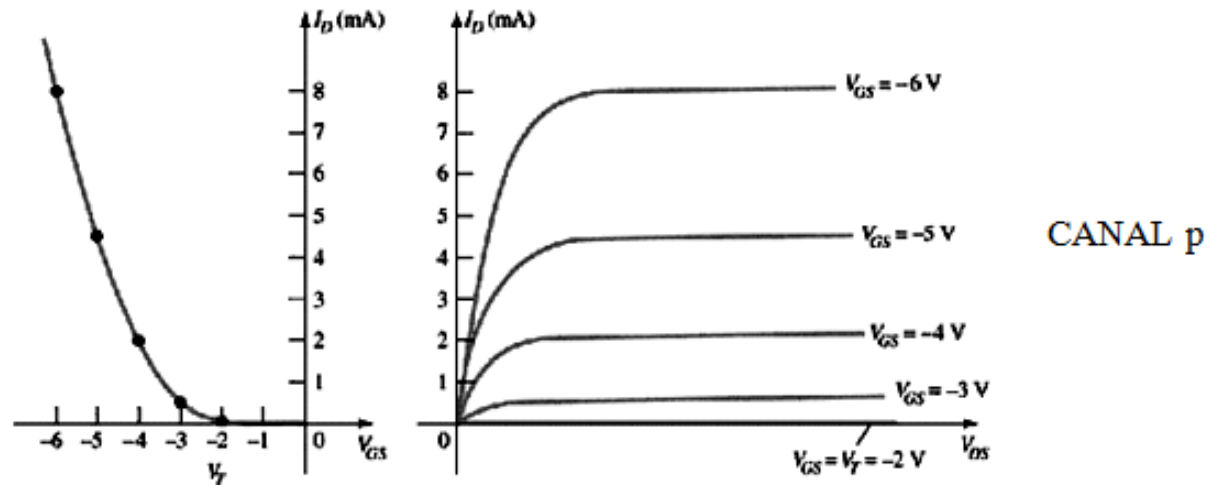
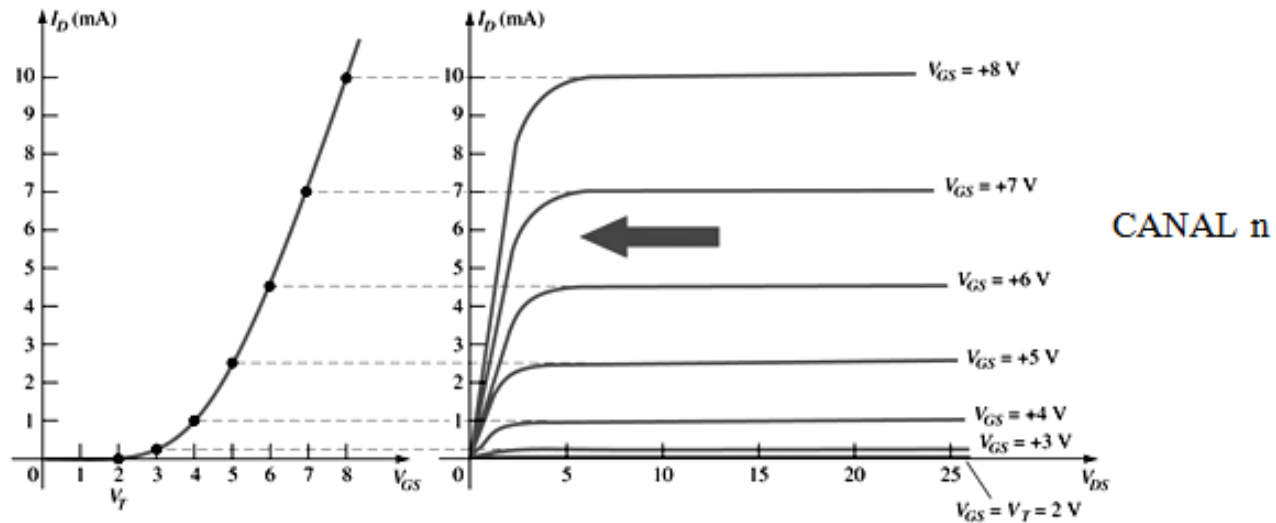
Canal n



Canal p

Transistor de Efeito de Campo (MOSFET)

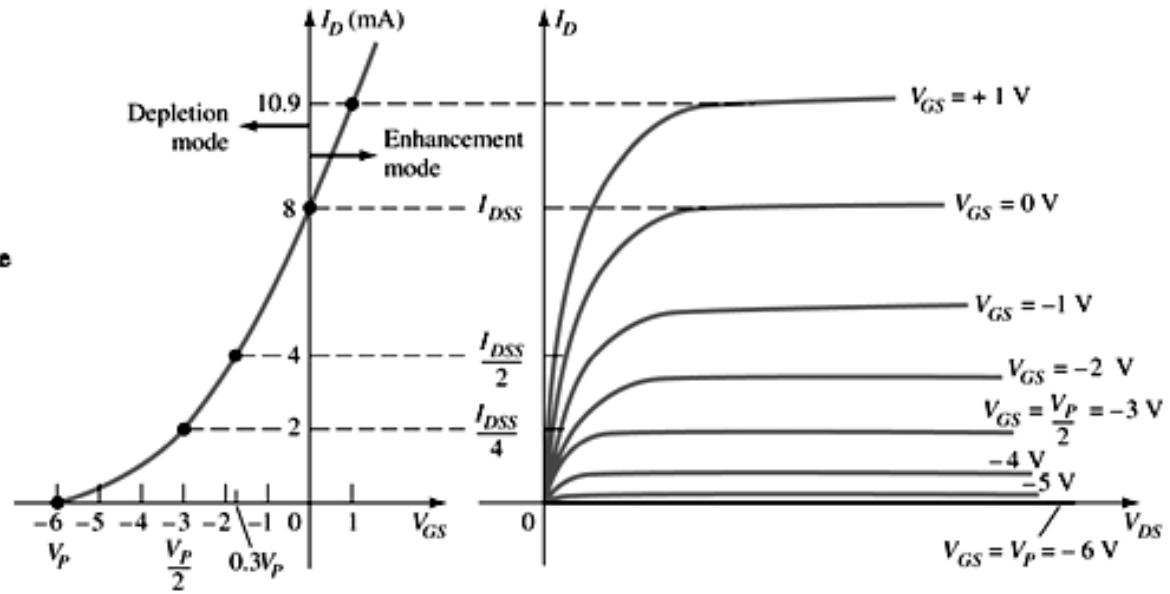
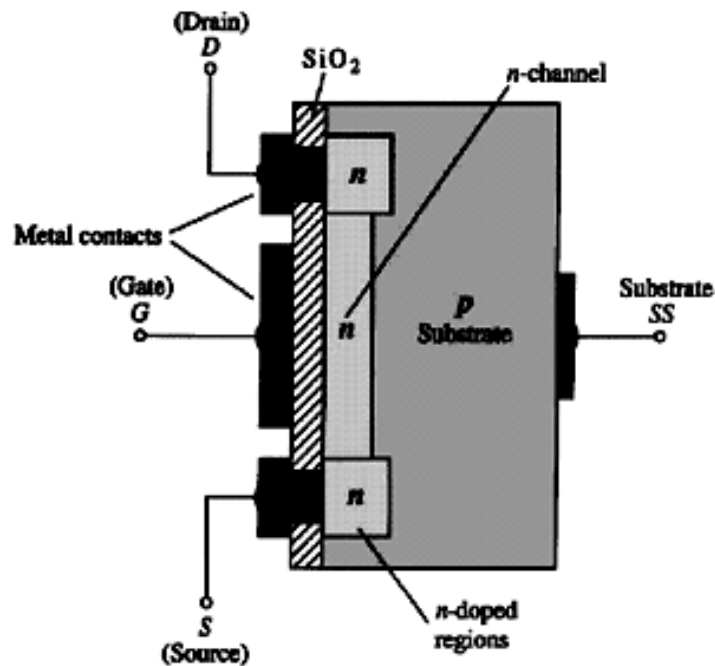
Curvas Características e de Transferência



Transistor de Efeito de Campo (MOSFET)

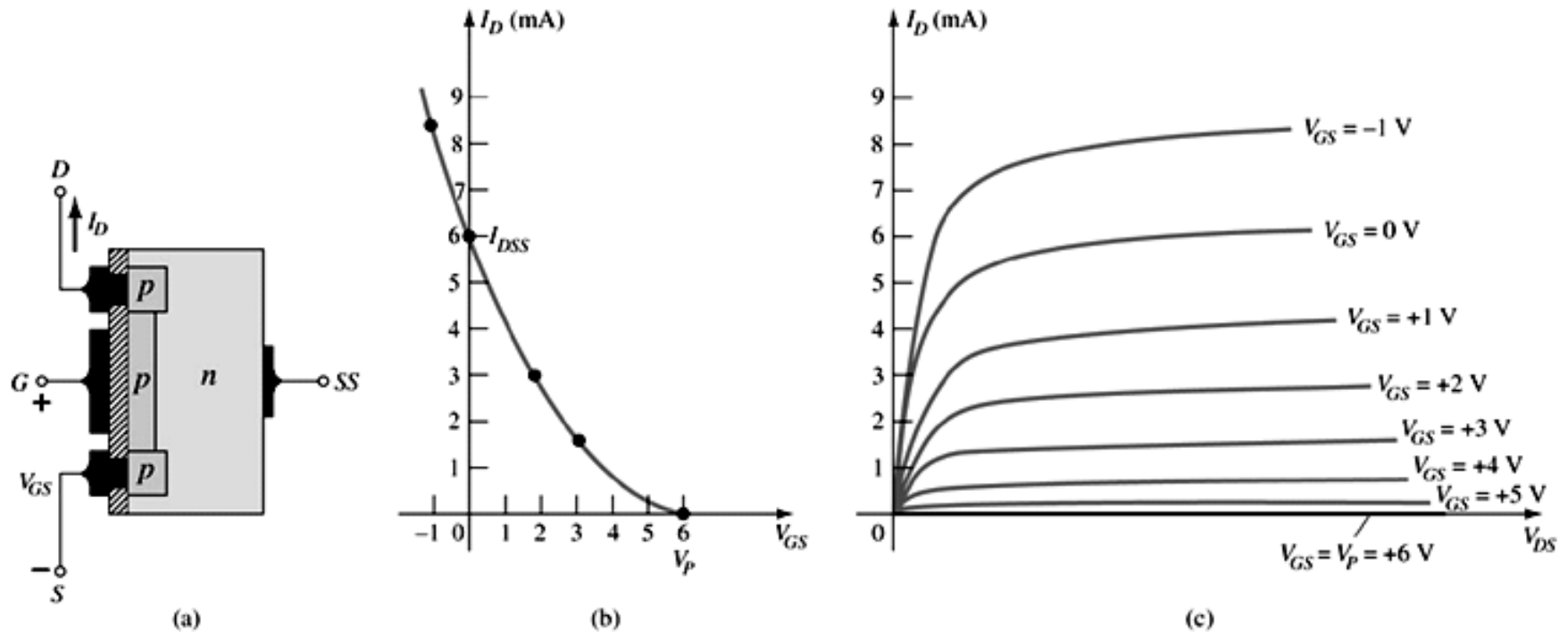
MOSFET – Tipo depleção

Possui um canal implantado fisicamente. Portanto, se V_{DS} for aplicada, circulará I_D com $V_{GS} = 0$.



Canal n

Transistor de Efeito de Campo (MOSFET)

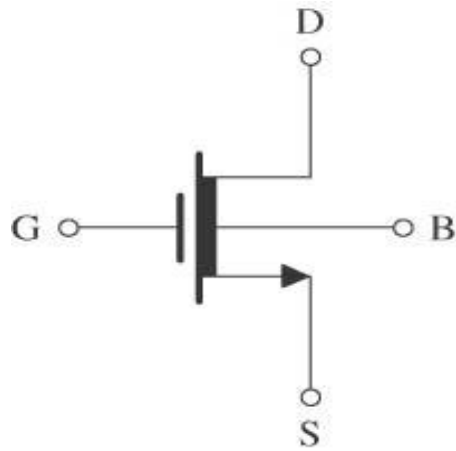


Canal p

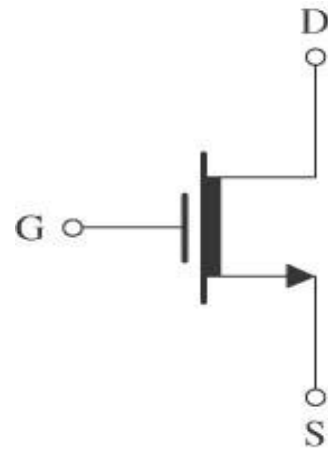
O valor da corrente de dreno obtido na saturação com $V_{GS} = 0$ é dado por:

$$I_{DSS} = \frac{1}{2} \cdot k'_n \cdot \left(\frac{W}{L} \right) \cdot (V_t)^2$$

MOSFET Depleção - Símbolo

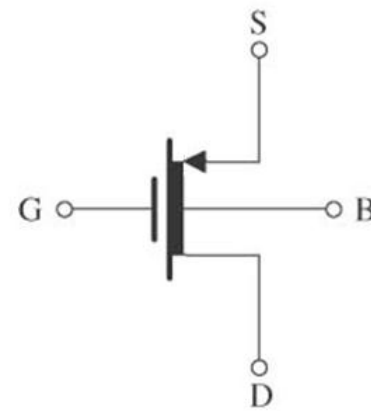


(a)

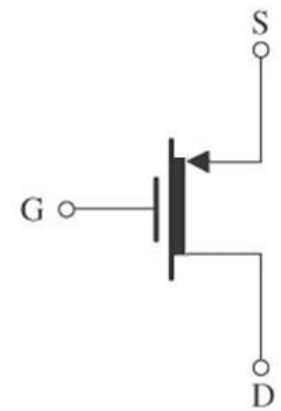


(b)

Canal n



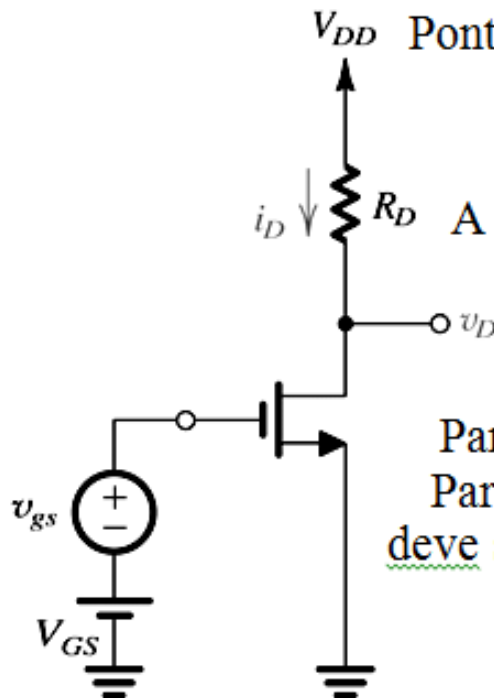
(a)



(b)

Canal p

Transistor de Efeito de Campo (MOSFET)



Ponto de Polarização cc – $v_{gs} = 0$ e assumindo $\lambda = 0$.

$$I_D = \frac{1}{2} \cdot (\mu_n \cdot C_{ox}) \cdot \left(\frac{W}{L} \right) \cdot (V_{GS} - V_t)^2$$

A tensão no dreno V_{DS} ou V_D , pois $V_S = 0$, será:

$$V_D = V_{DD} - R_D \cdot I_D$$

Para operar na região de saturação $V_D > V_{GS} - V_t$

Para garantir que o amplificador não tenha distorção, o sinal de entrada v_{gs} deve ser mantido pequeno, tal que $v_{gs} \ll 2 \cdot (V_{GS} - V_t)$.

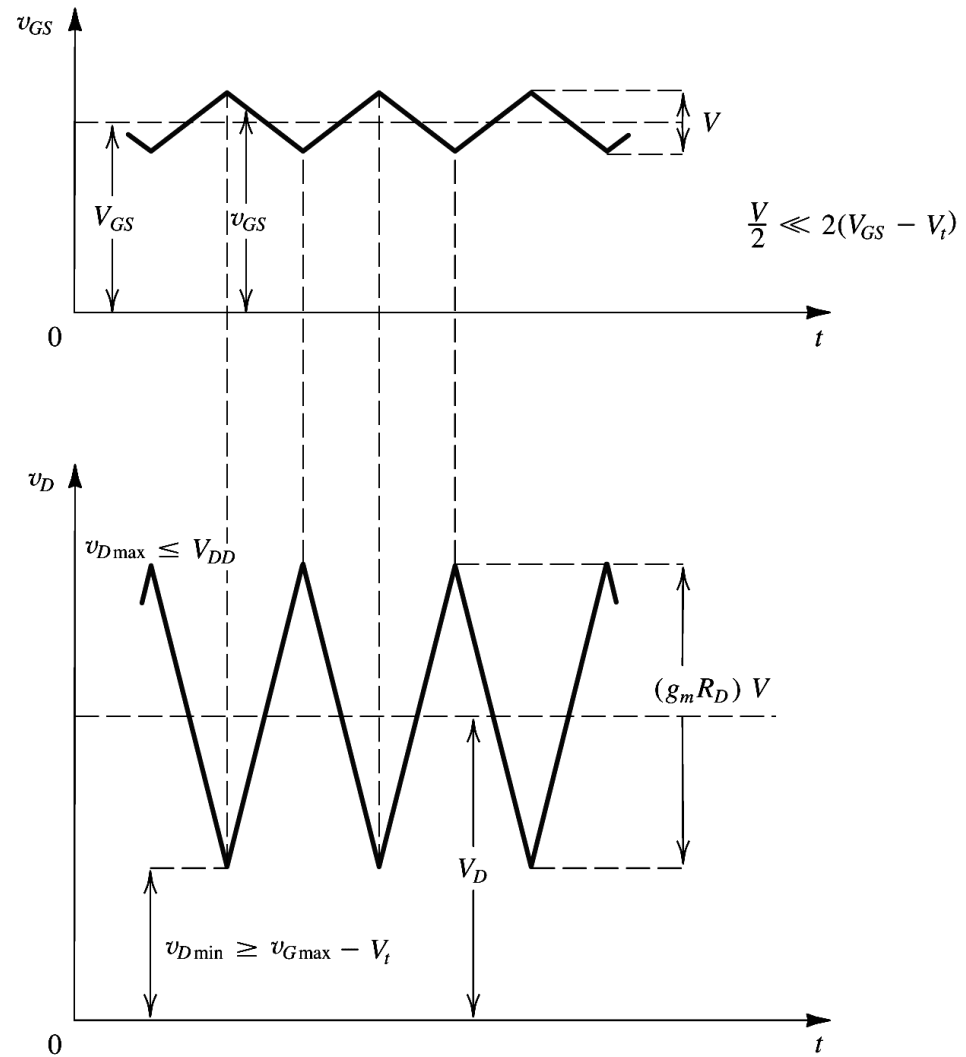
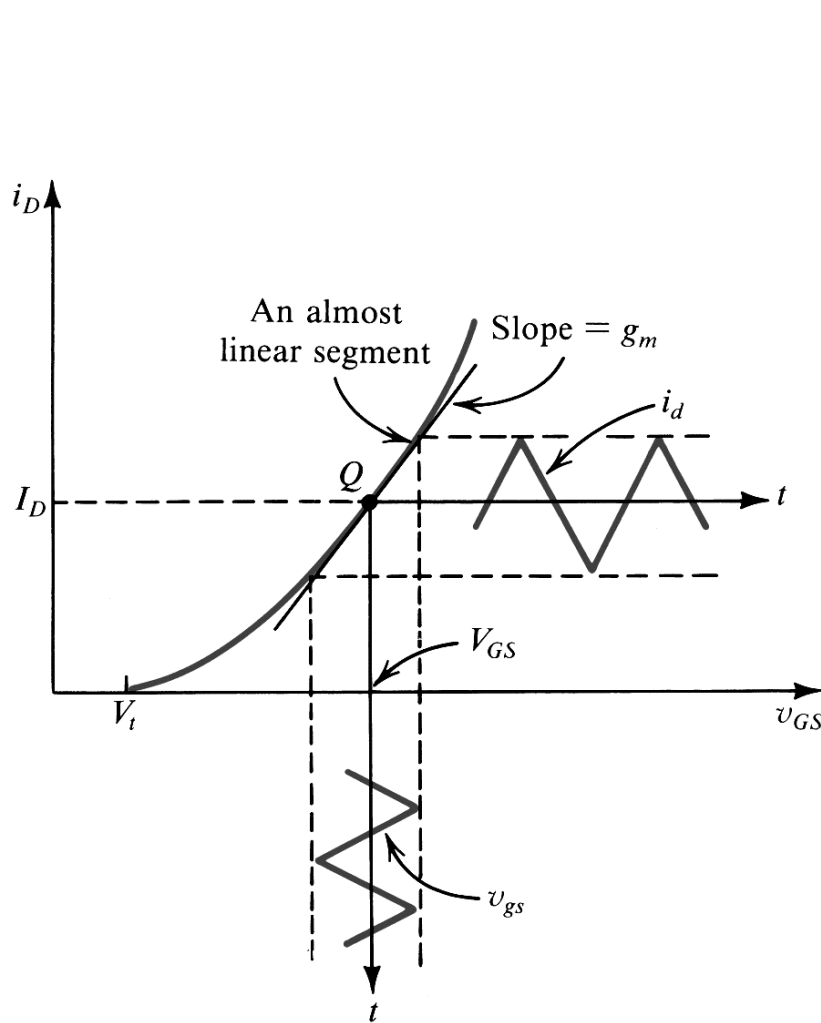
O parâmetro que relaciona i_d com v_{gs} é a transcondutância g_m dada por

$$g_m \equiv \frac{i_d}{v_{gs}} = k'_n \cdot \left(\frac{W}{L} \right) \cdot (V_{GS} - V_t)$$

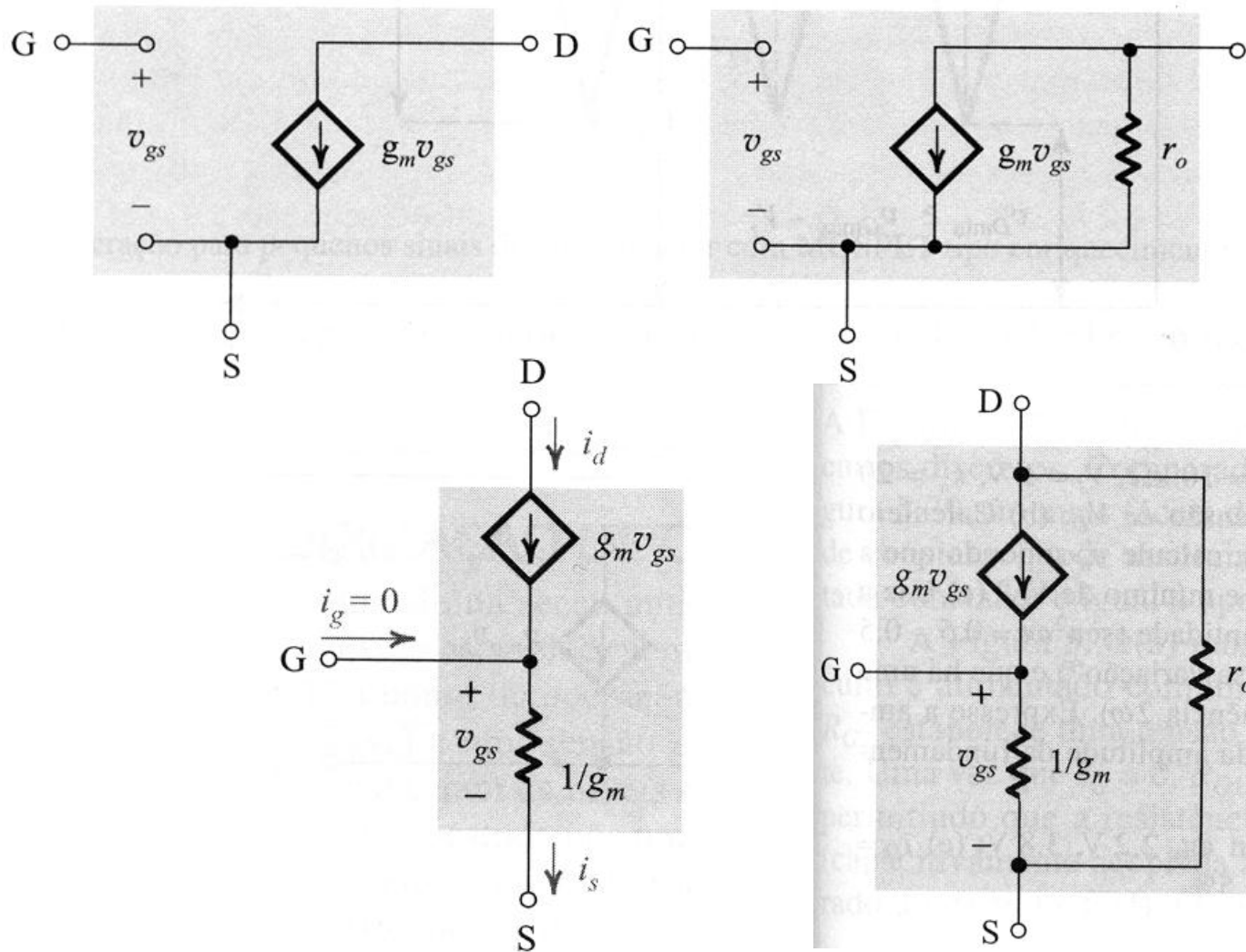
$$g_m = \sqrt{2 \cdot k'_n} \cdot \sqrt{\frac{W}{L}} \cdot \sqrt{I_D}$$

$$g_m = \frac{2 \cdot I_D}{V_{GS} - V_t} = \frac{I_D}{(V_{GS} - V_t)/2}$$

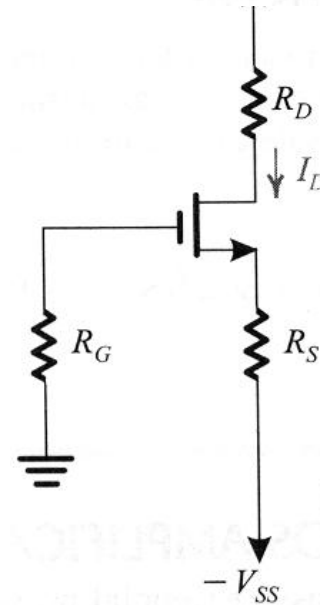
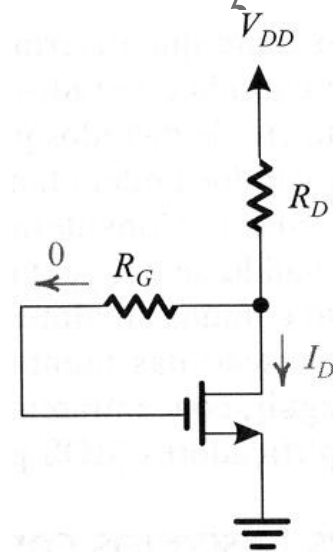
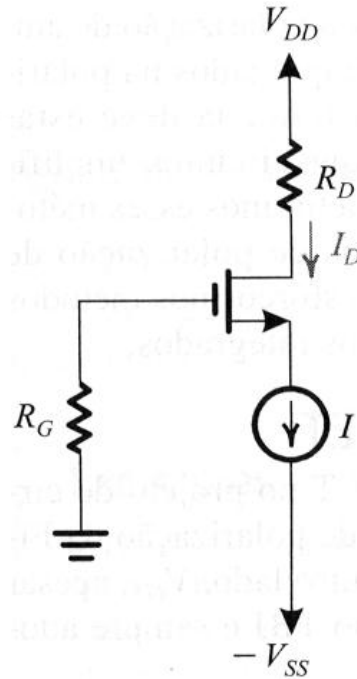
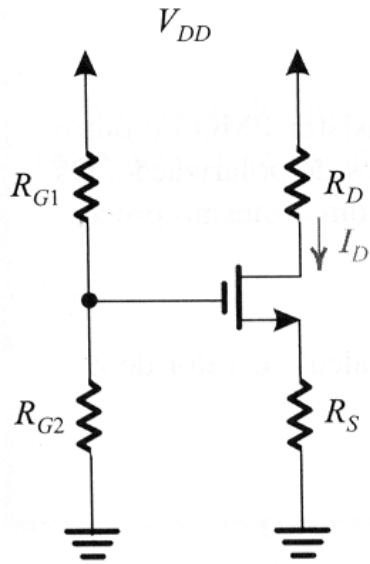
Transistor de Efeito de Campo (MOSFET)



Modelo para Pequenos Sinais (MOSFET)



MOSFET – Circuitos de Polarização

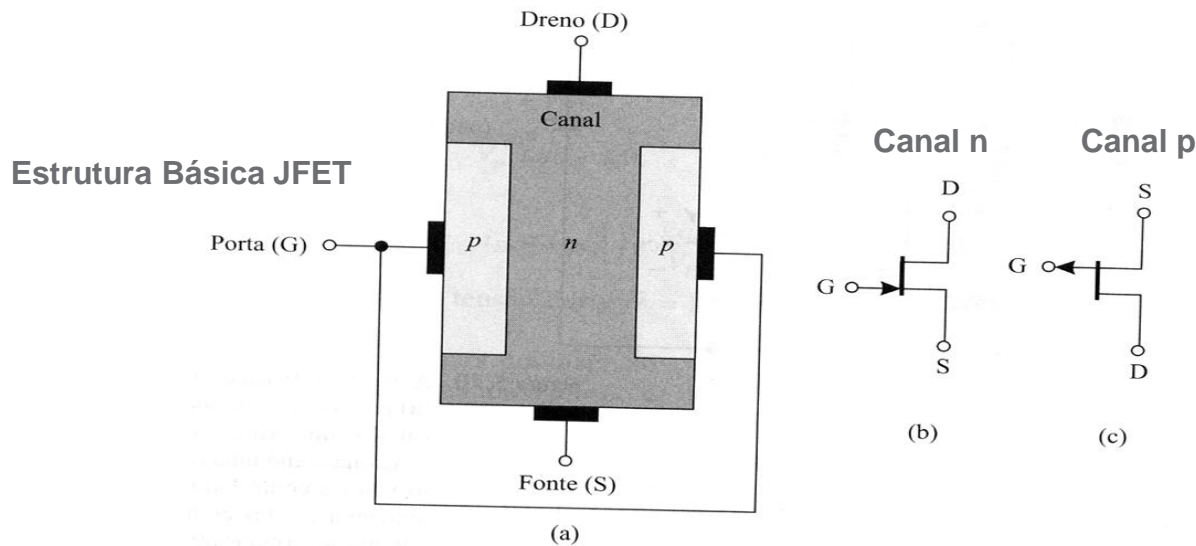


Transistor FET de junção (JFET)

O JFET tem uma impedância de entrada elevada, isso leva a uma perda de controle sobre a corrente de saída. O JFET é menos sensível às variações na tensão de entrada do que em um transistor bipolar.

- Uma variação de 0,1V em V_{GS} produz uma variação na corrente I_D menor que 10mA;
- Em um transistor bipolar, a mesma variação em V_{BE} produz uma variação em I_C muito maior.

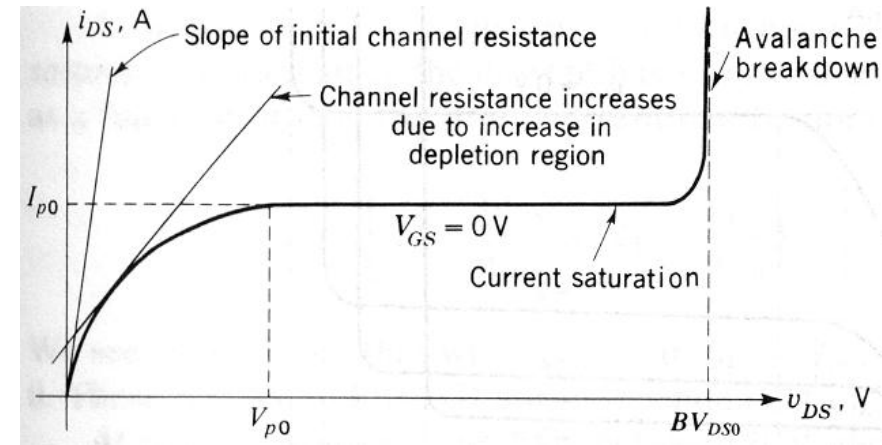
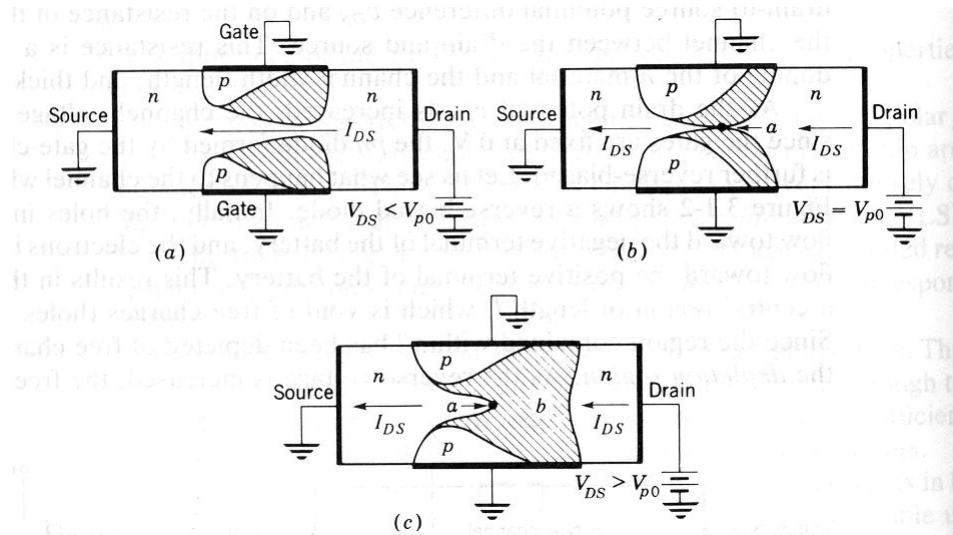
O JFET tem um ganho de tensão muito menor que o transistor bipolar. Alguns projetistas utilizam circuitos com JFET e BJT para garantir alta impedância de entrada com grandes ganhos de tensão.



Transistor FET de junção (JFET)

- Operação

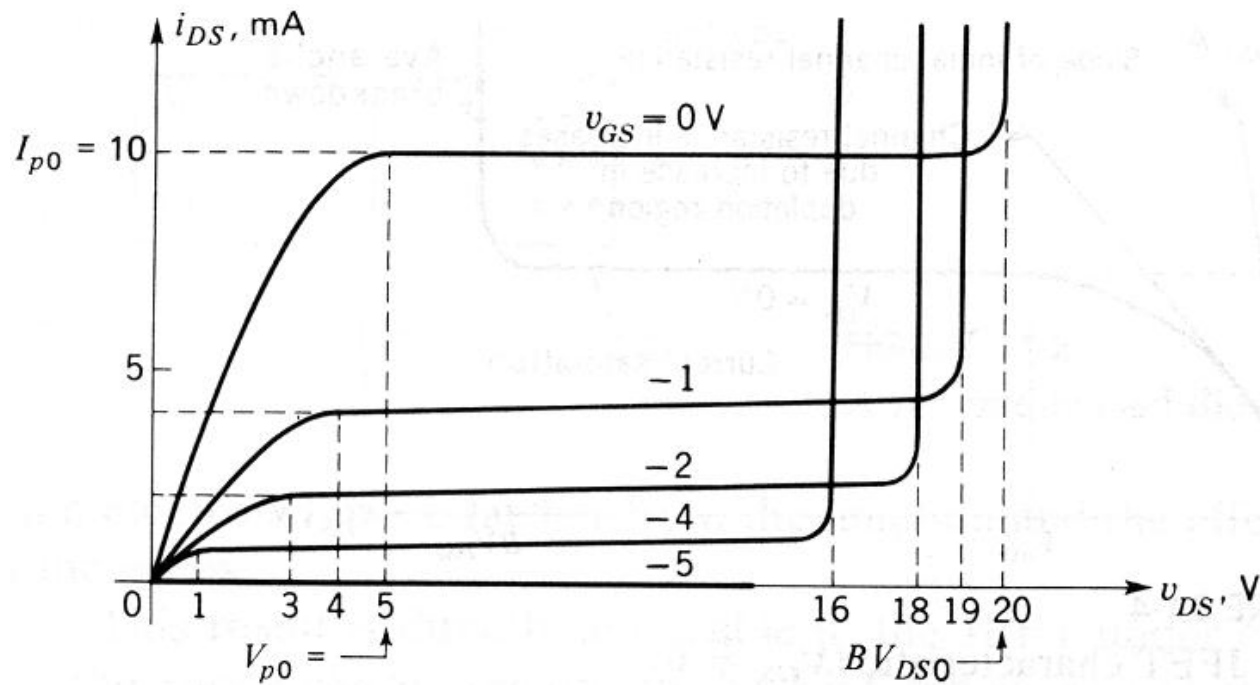
Se $V_{GS} = 0 \rightarrow$ aplicando uma tensão entre dreno-fonte (V_{DS}), começa a circular uma corrente do dreno para fonte (I_{DS}) – elétrons fluem da fonte para o dreno. A figura abaixo mostra o que ocorre com o JFET quando V_{DS} aumenta de valor.



No caso da figura (c), o campo elétrico produzido pela queda de tensão através da região de depleção atrai os elétrons emitidos pela fonte, através da região de depleção, para o dreno.

Transistor FET de junção (JFET)

Quando $V_{GS} < 0 \rightarrow$ aumenta região de depleção, pois há repulsão dos elétrons do canal; neste caso, o canal fica mais superficial e sua resistência incrementa e a corrente I_D decrementa para um dado V_{DS} . Sendo V_{DS} pequeno, o canal é quase uniforme e o JFET está simplesmente operando como uma resistência controlada por V_{GS} . Continuando aumentando negativamente a tensão V_{GS} alcançaremos um valor onde o canal desaparece ($I_D = 0$), ou seja, estará vazio de portadores de carga (elétrons – canal n). Este valor de tensão é a tensão de limiar (V_p) do dispositivo – para dispositivo canal n, V_p é negativo. Esta tensão também é chamada de tensão de estrangulamento (pinch-off voltage) e é representada por V_p .

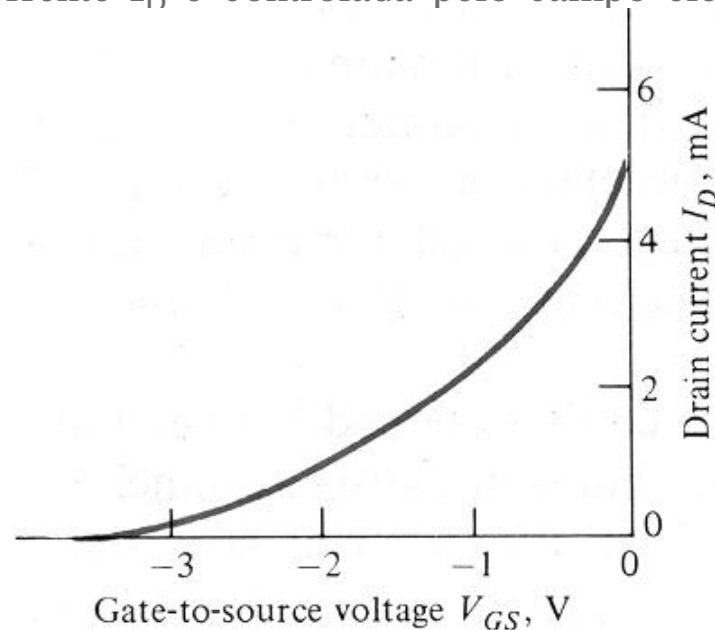


Transistor FET de junção (JFET)

Mantendo-se V_{GS} constante em um valor maior que V_p (menos negativo) \rightarrow incrementando V_{DS} a região de depleção incrementa de tamanho próximo ao dreno. Isto acontece devido ao diodo formado pela porta (p) e o canal (n) está mais reversamente polarizado próximo ao dreno. Assim, o canal fica com a forma afunilada e a característica $I_D \times V_{DS}$ torna-se não linear. Quando a polarização reversa no dreno, V_{GD} ($V_{GS} - V_{DS}$), cai abaixo da tensão V_p , o canal se estrangula no dreno e a corrente satura (I_{DSS}), ou seja, a corrente I_D permanece constante com o incremento de V_{DS} acima de V_p .

Quando o JFET está saturado a corrente I_n é controlada pelo campo elétrico criado entre porta (G) e fonte (S).

Característica de transferência $I_D \times V_{GS}$.
A inclinação da curva fornece g_m , ou a trancondutância, isto é, o parâmetro que relaciona I_D com V_{GS} .



Transistor FET de junção (JFET)

Então

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

A tensão V_{DS} para qual ocorre o estrangulamento do canal é dada por

$$V_{DS} = V_P = V_{p0} + V_{GS}$$

Assim, quando $V_{GS} = 0$, $V_P = V_{p0}$, como esperado. Para o gráfico anterior a tensão de estrangulamento é zero quando $V_{GS} = -5V$. Neste potencial negativo nenhuma corrente I_D flui pelo FET.

A tensão necessária entre dreno e o gate para causar o estrangulamento do canal é dada por

$$V_{DG} = V_{DS} - V_{GS} = V_{p0}$$

A corrente no dreno, na região de saturação, pode ser dada por:

$$I_{DS} = I_{DSS} \cdot \left[1 + \frac{3 \cdot V_{GS}}{V_P} + 2 \cdot \left(-\frac{V_{GS}}{V_P} \right)^{3/2} \right]$$



Transistor FET de junção (JFET)

Regiões de operação

- Corte: $V_{GS} \leq V_p$ e $I_D = 0$

- Triodo: $V_p \leq V_{GS} \leq 0$ e $V_{DS} \leq V_{GS} - V_p$

Para operar como chave, deve-se utilizar as regiões de corte e triodo.

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

- Saturação: $V_p \leq V_{GS} \leq 0$ e $V_{DS} \geq V_{GS} - V_p$

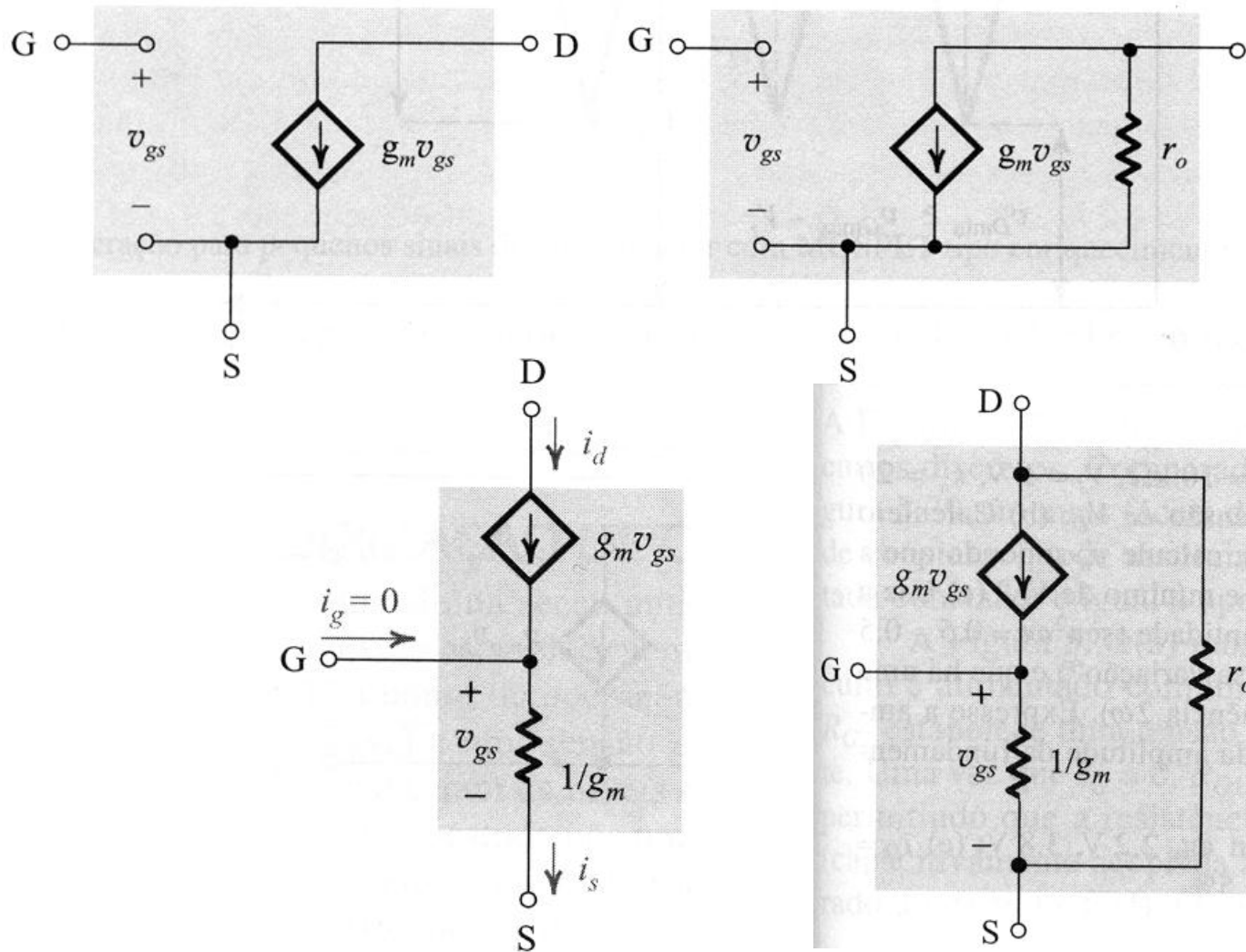
$$I_{DS} = I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^2 \quad \text{ou} \quad I_{DS} = I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^2 \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS})$$

onde o termo $(1 + \lambda \cdot V_{DS})$ representa a dependência linear de I_D com V_{DS} na região de saturação, sendo $\lambda = 1/V_A$ e V_A e λ são grandezas positivas para dispositivos canal n. Na maioria das vezes a modulação do canal poderá ser desconsiderada.

I_{DSS} é a corrente de saturação para $V_{GS} = 0$.



Modelo para Pequenos Sinais (JFET)



Modelo para Pequenos Sinais (JFET)

Cálculo de g_m

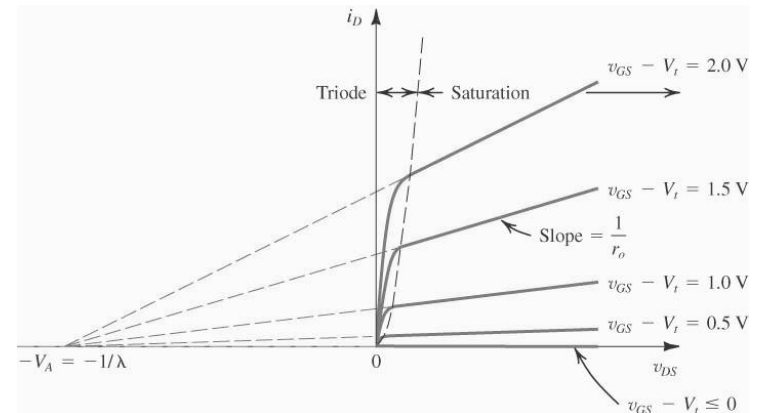
$$g_m = \left(\frac{2 \cdot I_{DSS}}{|V_P|} \right) \cdot \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)$$

ou alternativamente por

$$g_m = \left(\frac{2 \cdot I_{DSS}}{|V_P|} \right) \cdot \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}}$$

em que V_{GS} e I_D são as grandezas de polarização cc, e

$$r_o = \frac{|V_A|}{I_D}$$



Devemos lembrar que, para um dispositivo canal n, V_P é negativa e a operação na região de estrangulamento é obtida quando a tensão de dreno (D) é maior do que a tensão de porta (G) por pelo menos $|V_P|$.

<http://www-g.eng.cam.ac.uk/mmg/teaching/linearcircuits/jfet.html>

<http://www-g.eng.cam.ac.uk/mmg/teaching/linearcircuits/mosfet.html>