

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Considerações gerais

- Dispositivo com três terminais.
- Usados em múltiplas aplicações: amplificação de sinais, dispositivos digitais.
- Princípio básico: Uso de uma tensão entre dois terminais para controlar a corrente no terceiro terminal.
- Uso do sinal de controlo de modo a permitir que a corrente no terceiro terminal varie de zero a um valor elevado (dispositivo actuando como interruptor).

● FET – Field Effect Transistor

Vantagens dos MOSFETs

- Comparados com os BJT, os transístores MOS podem ser fabricados muito mais pequenos (i.e., ocupando uma área de silício muito mais pequena na pastilha de circuito integrado), além de o seu processo de fabrico ser mais simples. O consumo de energia é também inferior.



TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Transístores	Nível de integração	Abreviatura	Exemplo
2 -50	small-scale integration	SSI	
50 - 5000	medium-scale integration	MSI	
5000 - 100,000	Large-scale integration	LSI	Intel 8086 (29,000)
100K - 10 million	very large scale integration	VLSI	Pentium (3 million)
10 million to 1000 million	ultra large scale integration	ULSI	Pentium III (30 million)
1000 million -	super large scale integration	SLSI	

- Este nível de integração é definido em termos de transístores por circuito.



TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Estrutura do MOSFET

◆ A Fig. 1 mostra a estrutura física do MOSFET do tipo canal-n enriquecido (à frente veremos o porquê desta designação).

■ O transistor é fabricado num substrato do tipo p.

■ No substrato, foram criadas duas regiões do tipo n fortemente dopadas, indicadas na Fig. 1 como regiões n+, designadas por **fonte (source)** e **dreno**.

■ Uma camada fina (tipicamente de 2-50 nm) de dióxido de silício (SiO_2), (isolante eléctrico), foi desenvolvida na superfície do substrato, cobrindo a área entre as regiões da source e do dreno.

■ Seguidamente, deposita-se metal por cima da camada de óxido para formar o eléctrodo “gate” do dispositivo.

■ Finalmente, realizam-se contactos metálicos nas regiões da source, dreno e substrato.

■ Desta forma, foram criados quatro terminais: os terminais da gate (G), da source (S), do dreno (D) e do substrato ou corpo (B).

■ O nome do transistor MOS (metal-óxido-semicondutor) deriva da sua estrutura física.

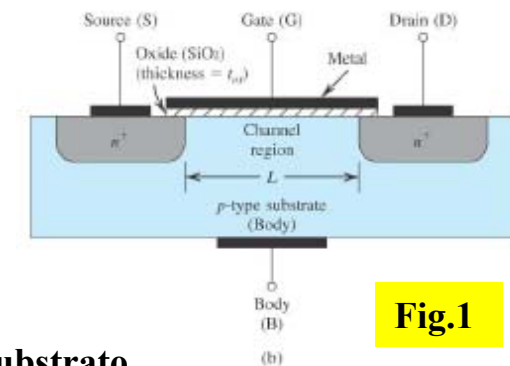
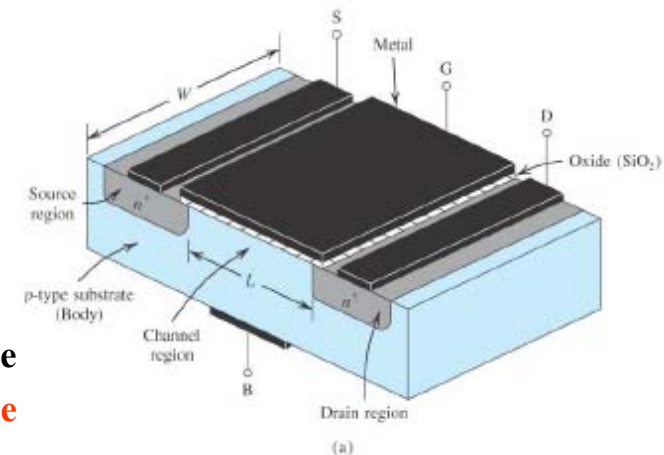


Fig.1

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Estrutura do MOSFET

- O substrato forma junções pn com as regiões da source e do dreno. Em funcionamento normal, estas junções pn são mantidas permanentemente inversamente polarizadas.
- Uma vez que o dreno vai estar com uma tensão positiva relativamente à source, as duas junções pn podem ser efectivamente colocadas em corte, **ligando simplesmente o terminal do substrato ao terminal da source**. Admita-se que é esse o caso na descrição do funcionamento do MOSFET a seguir desenvolvida.
- Desta forma, o substrato poderá ser considerado como não tendo nenhum efeito no funcionamento do dispositivo, e o MOSFET poderá ser tratado como um dispositivo de três terminais, i.e., a gate (G), a source (S) e o dreno (D).
- Iremos verificar que uma tensão aplicada à gate controla o fluxo de corrente entre a source e o dreno. Esta corrente flui na direcção longitudinal do dreno para a source na região designada por “canal”.
- A região do canal tem um comprimento L e uma largura W , dois importantes parâmetros do MOSFET. Tipicamente, L tem valores entre 0.11 e 3 μm , e W entre 0.2 e 100 μm .
- O MOSFET é normalmente construído como um dispositivo simétrico. Assim, a source e o dreno podem ser trocados sem alteração das características do transistor.



TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Funcionamento sem tensão na gate

- Se não for aplicada qualquer tensão de polarização à gate, entre a source e o dreno existem dois díodos em série opostos.
- Um diodo é constituído pela junção pn formada pela região n⁺ do dreno e o substrato do tipo p e o outro pela junção formada pelo substrato e a região n⁺ da source.
- Se se aplicar uma tensão v_{DS} positiva entre o dreno e a source, a existência destes dois díodos impede que flua corrente entre o dreno e a source.
- De facto, o percurso entre o dreno e a source tem uma resistência muito elevada (da ordem de $10^{12} \Omega$).

Criação de um canal para a condução de corrente

- Source e o dreno ligados à massa. Aplicação de uma tensão positiva à gate (Fig. 2).
- Uma vez que a source está à massa, toda a tensão da gate aparece entre a gate e a source, pelo que foi designada por v_{GS} .
- A tensão positiva da gate tem dois efeitos:

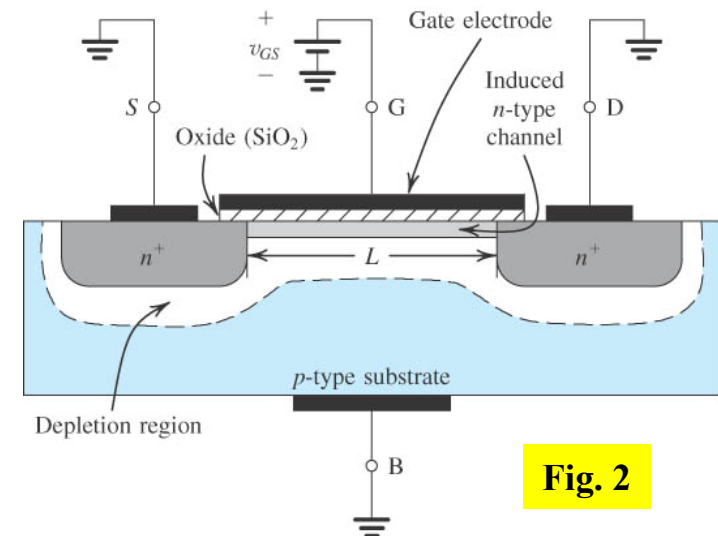


Fig. 2

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

■ A tensão positiva da gate tem dois efeitos:

Criação de um canal para a condução de corrente

■ Por um lado, origina que as lacunas (cargas positivas) sejam repelidas da região do substrato situada por baixo da gate (a região do canal).

■ Estas lacunas são empurradas para baixo, deixando atrás uma região esvaziada de portadores. Esta região de depleção contém iões negativos correspondentes aos átomos aceitadores que perderam as lacunas que foram repelidas.

■ Por outro lado, a tensão positiva da gate atrai electrões das regiões n+ da source e do dreno (onde existem em abundância) para a região do canal. Quando o número de electrões acumulado junto da superfície do substrato por baixo da gate é suficiente, constitui-se, de facto, uma **região n** ligando a source e o dreno, como se indica na Fig. 2.

■ Aplicando uma tensão positiva entre o dreno e a source, flui corrente nesta **região n** induzida, transportada pelos electrões móveis. A região n induzida forma, assim, um **canal** por onde a corrente flui do dreno para a source, pelo que essa designação é apropriada.

■ O MOSFET da fig. 2 é chamado MOSFET de **canal n** ou, alternativamente, transístor NMOS.

■ Note-se que um MOSFET de canal n é formado num substrato do tipo p e o canal é criado invertendo a superfície do substrato do tipo p para o tipo n. Por esta razão, o canal induzido é, também, designado por camada de inversão.



TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Criação de um canal para a condução de corrente

■ O valor de v_{GS} necessário para que um número suficiente de electrões móveis se acumulem na região do canal para formar um canal condutor é chamado **tensão limiar** e é designado por V_t . Obviamente, V_t para um FET de canal n é positiva. O valor de **V_t é controlado durante o fabrico do dispositivo** e, tipicamente, toma valores compreendidos entre 0.5 e 1.0 V.

■ A gate e o corpo do MOSFET formam um condensador de placas paralelas em que o dieléctrico é a camada de óxido. A tensão positiva da gate faz com que se acumule carga positiva na placa superior do condensador (o eléctrodo da gate). A correspondente carga negativa da placa inferior é formada pelos electrões do canal induzido. Desenvolve-se, assim, um campo eléctrico vertical entre a gate e o substrato. É este campo eléctrico que controla a quantidade de carga no canal, determinando assim a sua condutividade e, consequentemente, a corrente que flui no canal quando se aplica uma tensão v_{DS} .



TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Funcionamento com pequeno valor de v_{DS}

■ Tendo-se já induzido um canal, aplique-se agora uma tensão v_{DS} positiva entre o dreno e a source (Fig. 3).

■ Consideremos, primeiramente, o caso em que v_{DS} é pequena (digamos, 50mV).

■ A tensão v_{DS} faz com que flua uma corrente i_D no canal n induzido.

■ Esta corrente é constituída por electrões que viajam da source para o dreno (daí os nomes source e dreno).

■ Por convenção a direcção da corrente é contrária ao fluxo das cargas negativas, logo a corrente no canal é do dreno para a source.

■ A grandeza de i_D depende da densidade de electrões no canal, que, por sua vez, depende da grandeza de v_{GS} .

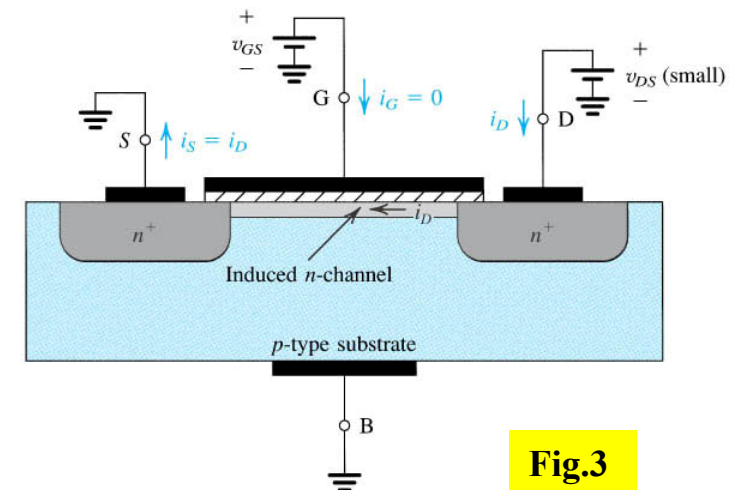


Fig.3

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Funcionamento com pequeno valor de v_{DS}

- Concretamente, para $v_{GS} = V_t$ o canal está limiarmente induzido pelo que a corrente é ainda muito pequena.
- Para $v_{GS} > V_t$ mais electrões são atraídos para o canal (aumento da profundidade) dando origem a uma redução da resistência ou aumento da condutância. A condutância do canal é proporcional à **tensão da gate em excesso** ($v_{GS} - V_t$) ou tensão de **overdrive** (V_{ov}) ($V_{ov} = v_{GS} - V_t$)
- A corrente i_D será proporcional a $v_{GS} - V_t$ e, obviamente, à tensão v_{DS} que origina i_D .



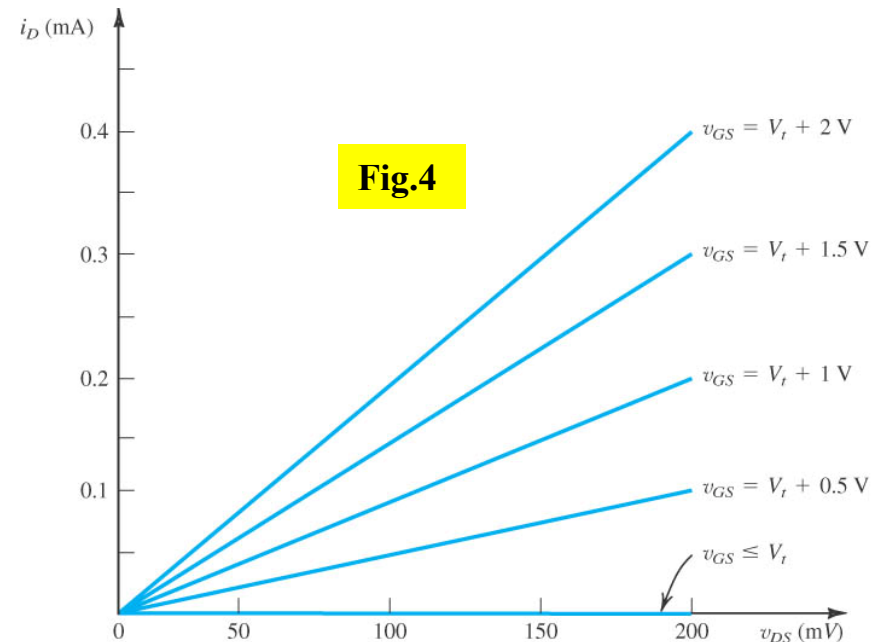
TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

- Esboço de i_D versus v_{DS} para vários valores de v_{GS} (Fig. 4).
- Vemos que o MOSFET funciona como uma resistência linear cujo valor é controlado por v_{GS} .
- A resistência é infinita para $v_{GS} \leq V_t$. O seu valor diminui à medida que v_{GS} se torna maior do que V_t .

CONCLUSÕES IMPORTANTES

- A descrição anterior indica que para o MOSFET conduzir, é necessário **induzir um canal**. O aumento de v_{GS} acima da tensão limiar V_t enriquece o canal, e daí as designações funcionamento em modo de enriquecimento e **MOSFET de enriquecimento**. Finalmente, notemos que a corrente que sai do terminal da source (i_S) é igual à corrente que entra pelo terminal do dreno (i_D) e que a corrente da gate $i_G = 0$.

Funcionamento com pequeno valor de v_{DS}



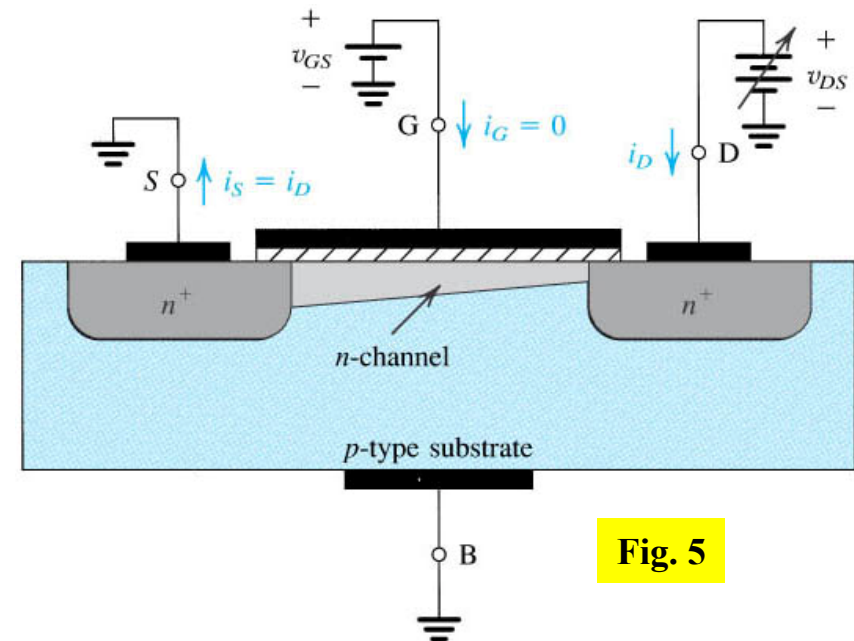
TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Funcionamento com v_{DS} superiores

■ Considere-se, agora, que v_{DS} se torna maior, e que v_{GS} é mantida constante num valor maior do que V_t .

■ Note-se que v_{DS} aparece como uma queda de tensão ao longo do canal, i.e., se percorrermos o canal desde a source até ao dreno, a tensão (medida em relação à source) aumenta de 0 até v_{DS} .

■ Assim, a tensão entre a gate e pontos ao longo do canal diminui desde o valor v_{GS} , na extremidade da source, até ao valor $v_{GS} - v_{DS}$, na extremidade do dreno.



■ Uma vez que a profundidade do canal depende desta tensão, concluímos que o canal não tem, agora, profundidade uniforme; pelo contrário, exhibe a forma afunilada que se vê na Fig. 5, com maior profundidade do lado da source e menor do lado do dreno.

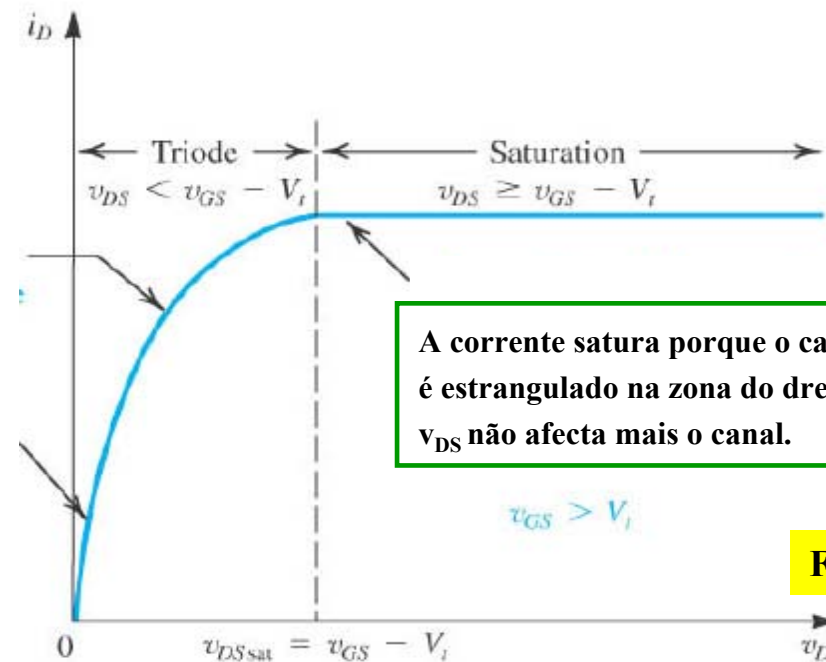
TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Funcionamento com v_{DS} superiores

■ Quando v_{DS} aumenta, o canal torna-se mais afunilado e a sua resistência aumenta correspondentemente. Assim, a curva $i_D - v_{DS}$ deixa de ser rectilínea, encurvando como se mostra na fig. 6.

Curvatura devido ao aumento da resistência do canal com v_{DS}

Quase linha recta, com inclinação proporcional a $(v_{GS} - V_t)$



A corrente satura porque o canal é estrangulado na zona do dreno. v_{DS} não afecta mais o canal.

Fig. 6

Note-se que à medida que v_{DS} aumenta, a tensão $v_{GD} = v_{GS} - v_{DS}$, diminui, i.e., a tensão entre a gate e o canal na extremidade do dreno. Quando v_{DS} atinge o valor que reduz a tensão v_{GD} ao valor V_t , i.e., $v_{GS} - v_{DS} = V_t$ ou $v_{DS} = v_{GS} - V_t$, a profundidade do canal do lado do dreno diminui para zero, dizendo-se então que o canal está estrangulado (**pinched off**).

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Notas Importantes

- A tensão v_{DS} para a qual ocorre a **saturação** é designada por v_{DSsat} $\longrightarrow v_{DSsat} = v_{GS} - V_t$
- Para cada valor de $v_{GS} \geq V_t$, há um valor correspondente de $v_{DS,sat}$.
- O transistor opera na região de saturação se $v_{DS} \geq v_{DS,sat}$.
- A região das características i_D - v_{DS} obtidas para $v_{DS} < v_{DS,sat}$ é chamada região de **tríodo**, uma designação herdada do tempo das válvulas. Esta região também designada como região **óhmica**.

Evolução do canal à medida que v_{DS} aumenta enquanto v_{GS} permanece constante.

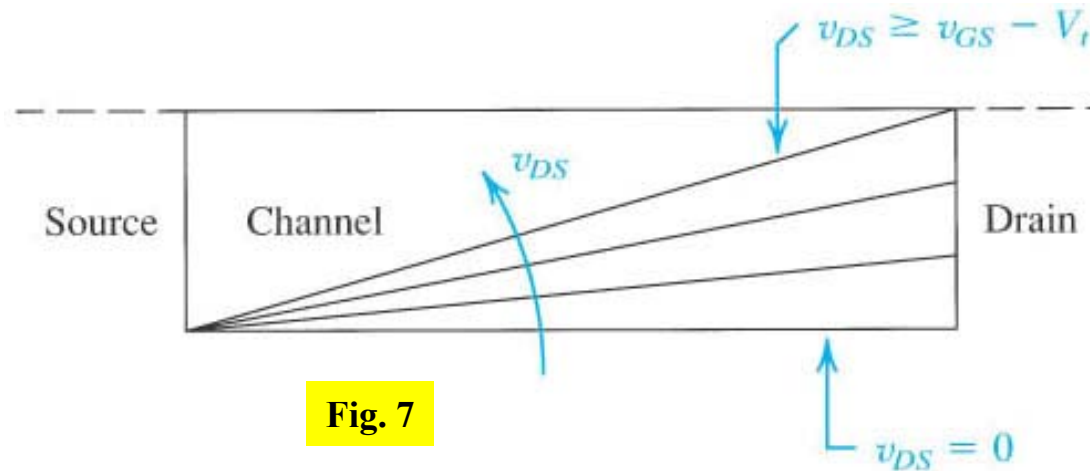


Fig. 7

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Dedução da relação $i_D - v_{DS}$.

- Assuma-se que a tensão v_{GS} é aplicada entre a gate e a source com $v_{GS} > V_t$, para induzir o canal.
- Assuma-se, também, que a tensão v_{DS} é aplicada entre o dreno e a source.
- Considere-se a operação na região tródo, para a qual o canal deve ser contínuo e assim v_{GS} deve ser maior de que V_t , ou de forma equivalente, $v_{DS} < v_{GS} - V_t$.
- O canal nestas circunstâncias tem a forma ilustrada na Fig. 8.

A região do canal forma um condensador plano em que o SiO_2 funciona como dieléctrico.

Capacidade por unidade de área da gate

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

ϵ_{ox} = Permitividade do óxido = $3.9 \epsilon_0 = 3.45 \times 10^{-11} \text{ F/m}$

t_{ox} é a espessura do óxido

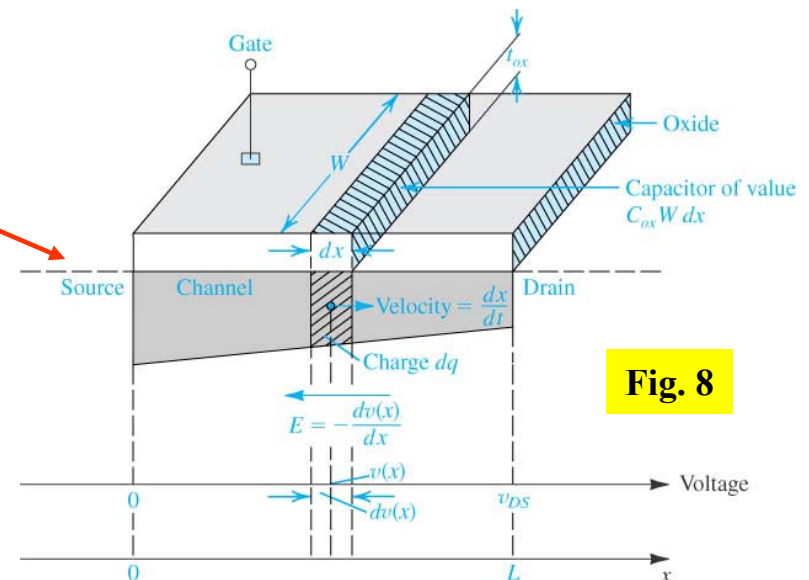


Fig. 8

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Dedução da relação $i_D - v_{DS}$.

Exemplo

Para $t_{ox} = 10 \text{ nm}$

$C_{ox} = 3.45 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2$

- Considere-se, agora, a faixa infinitesimal da gate a uma distância x da fonte.
- A capacidade desta faixa é $C_{ox} W dx$.
- Para o cálculo da carga armazenada nesta faixa infinitesimal da gate, multiplica-se a capacidade pela tensão efectiva entre a gate e o canal no ponto x ($Q=CV$), onde esta tensão é a tensão que é responsável pela indução do canal no ponto x (dada por, $v_{GS} - v(x) - V_t$) onde $v(x)$ é a tensão no canal no ponto x .
- A carga do electrão dq na porção infinitesimal do canal, no ponto x , é:

$$dq = -C_{ox} (Wdx) [v_{GS} - v(x) - V_t] \quad (1)$$

- O sinal negativo, refere-se ao facto da carga ser negativa.

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Dedução da relação $i_D - v_{DS}$

■ A tensão v_{DS} produz um campo eléctrico ao longo do canal na direcção negativa x . No ponto x , este campo é dado por:

$$E(x) = -\frac{dv(x)}{dx} \quad (2)$$

■ O campo eléctrico $E(x)$ leva a que a carga se movimente em direcção ao dreno, com uma velocidade dx/dt

$$\frac{dx}{dt} = -\mu_n E(x) = \mu_n \frac{dv(x)}{dx} \quad (3)$$

Mobilidade dos electrões

■ A corrente resultante i pode ser obtida por $\longrightarrow i = \frac{dq}{dt} = \frac{dq}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (4)$

■ Usando as equações (1) e (3), vem:

$$i = -\mu_n C_{ox} W [v_{GS} - v(x) - V_t] \frac{dv(x)}{dx} \quad (5)$$

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Dedução da relação $i_D - v_{DS}$

- Embora calculada num ponto específico do canal, a corrente i tem de ser constante em todos os pontos, ao longo do canal.
- Assim, a corrente tem de ser igual à corrente da source para o dreno (i_D)

$$i_D = -i = \mu_n C_{ox} W [v_{GS} - v(x) - V_t] \frac{dv(x)}{dx} \quad (6)$$

ou

$$i_D dx = \mu_n C_{ox} W [v_{GS} - v(x) - V_t] dv(x)$$

- Integrando ambos os lados da equação, com limites de $x=0$ a $x=L$, correspondentemente, para $v(0) = 0$ a $v(L)=v_{DS}$

$$\int_0^L i_D dx = \int_0^{v_{DS}} \mu_n C_{ox} W [v_{GS} - v(x) - V_t] dv(x)$$

$$i_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_t) v_{DS} - \frac{1}{2} v_{DS}^2 \right] \quad (7)$$

Expressão que representa a característica $i_D - v_{DS}$ na região do tródo.

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Dedução da relação $i_D - v_{DS}$

O valor da corrente no início da região de saturação, pode ser obtida substituindo $v_{DS} = v_{GS} - V_t$

$$i_D = \frac{1}{2} (\mu_n C_{ox}) \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 \quad (8)$$

Expressão que representa a característica $i_D - v_{DS}$ na região de saturação.

- Para um dado valor de v_{GS} , obtém-se o correspondente valor de saturação i_D
- $\mu_n C_{ox}$ é uma constante determinada pelo processo tecnológico usado para fabricar o MOSFET canal n. É designado por **parâmetro de transcondutância do processo**.
- Este parâmetro determina o valor da transcondutância do MOSFET, é designado por k'_n e tem as dimensões de A/V²:

$$k'_n = \mu_n C_{ox} \quad (9)$$

- Substituindo (9) em (8) e (7), resulta:

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_t) v_{DS} - \frac{1}{2} v_{DS}^2 \right]$$

Região de triodo

Região de saturação

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2$$

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Dedução da relação $i_D - v_{DS}$

- Das equações (7) e (8), constata-se que a corrente de dreno é proporcional à relação entre largura do canal W e o comprimento do mesmo L , conhecido “*aspect ratio*” do MOSFET.
- Os valores de W e de L podem ser seleccionados pelo projectista de modo a obter a característica $i - v$ desejada.

EXEMPLO 1

- Considere um processo tecnológico, tal que: $L_{\min} = 0.4 \mu\text{m}$, $t_{\text{ox}} = 8 \text{ nm}$, $\mu_n = 450 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ e $V_t = 0.7 \text{ V}$.
- a) Determine C_{ox} e k'_n .
- b) Para um mosfet com $W/L = 8 \mu\text{m} / 0.8 \mu\text{m}$, calcule os valores de V_{GS} e de V_{DSmin} , necessários para operar o transistor na região de saturação com uma corrente de $I_D = 100 \mu\text{A}$.
- c) Para o dispositivo em (b), determine o valor de V_{GS} necessário para que o dispositivo opere como uma resistência de 1000Ω para um valor muito pequeno de v_{DS} .



TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

SOLUÇÃO

$$\begin{aligned}
 \text{a) } C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = \frac{3.45 \times 10^{-11}}{8 \times 10^{-9}} = 4.32 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2 \\
 &= 4.32 \text{ fF}/\mu\text{m}^2 \\
 k'_n &= \mu_n C_{ox} = 450 (\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}) \times 4.32 (\text{fF}/\mu\text{m}^2) \\
 &= 450 \times 10^8 (\mu\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}) \times 4.32 \times 10^{-15} (\text{F}/\mu\text{m}^2) \\
 &= 194 \times 10^{-6} (\text{F}/\text{V}\cdot\text{s}) \\
 &= 194 \mu\text{A}/\text{V}^2
 \end{aligned}$$

(c) Para o mosfet na região do triodo com v_{DS} muito pequeno.

$$i_D \cong k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t) v_{DS}$$

A resistência do dreno para a source r_{DS} , pode ser determinada:

$$\begin{aligned}
 r_{DS} &= \left. \frac{v_{DS}}{i_D} \right|_{\text{small } v_{DS}} \\
 &= 1 / \left[k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) \right]
 \end{aligned}$$

(b) Para operação na região de saturação

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2$$

Assim,

$$100 = \frac{1}{2} \times 194 \times \frac{8}{0.8} (V_{GS} - 0.7)^2$$

Resultando,

$$V_{GS} - 0.7 = 0.32 \text{ V}$$

ou

$$V_{GS} = 1.02 \text{ V}$$

e

$$V_{DS\min} = V_{GS} - V_t = 0.32 \text{ V}$$

$$1000 = \frac{1}{194 \times 10^{-6} \times 10 (V_{GS} - 0.7)}$$

$$V_{GS} - 0.7 = 0.52 \text{ V}$$

$$V_{GS} = 1.22 \text{ V}$$

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

O MOSFET de canal p

- Um MOSFET de enriquecimento de canal p (transístor PMOS) é fabricado num substrato do tipo n com regiões p^+ para o dreno e a source, e usa lacunas como portadores de carga.
- O dispositivo funciona da mesma maneira que o de canal n , excepto que v_{GS} e v_{DS} são negativas e a tensão limiar V_t é negativa. A corrente i_D entra pelo terminal da source e sai pelo terminal do dreno.
- De facto, como os portadores de carga nos NMOS são electrões, e estes têm uma mobilidade cerca de três vezes maior do que as lacunas, no silício, os transístores NMOS podem ocupar uma área menor e, assim, serem mais rápidos, além de requererem menores tensões de alimentação.
- Todavia, não se deve ignorar os PMOS por duas razões: os PMOS continuam a ser fabricados para circuitos discretos, e principalmente porque os circuitos CMOS (MOS complementar) que são actualmente a tecnologia dominante, utilizam os dois tipos de transístores, NMOS e PMOS.



TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

MOS complementar ou CMOS

- A tecnologia MOS complementar utiliza transístores MOS das duas polaridades.
- De facto, actualmente, a tecnologia CMOS é a mais usada de todas as tecnologias de circuitos integrados MOS, quer no que respeita a circuitos analógicos, quer digitais.

■ A Fig. 9 temos uma secção transversal duma pastilha CMOS ilustrando como os transístores PMOS e NMOS são fabricados.

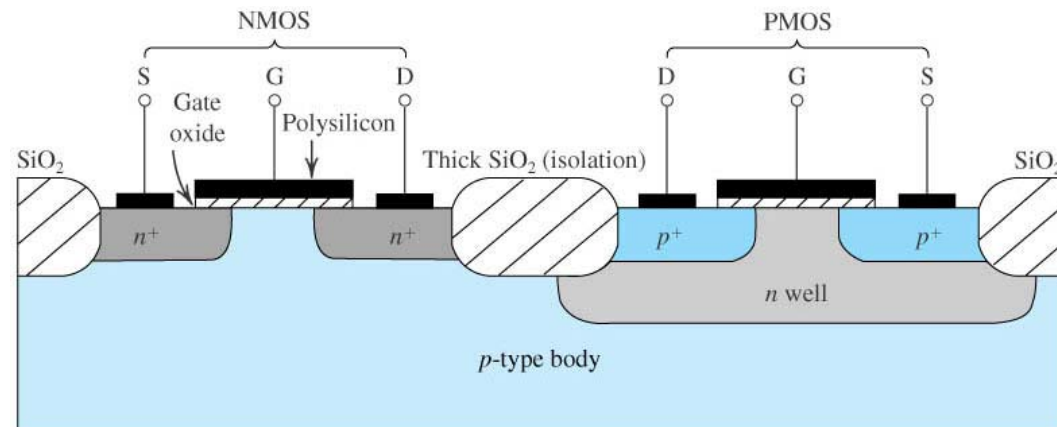


Fig. 9

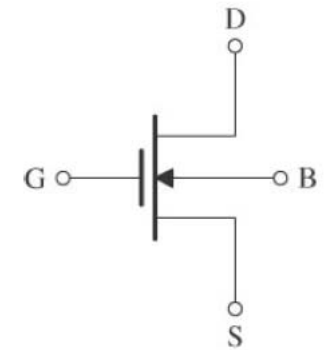
- Note-se que enquanto o transístor NMOS é implementado directamente no substrato do tipo p, o transístor PMOS é fabricado numa região n especialmente criada, conhecida como um **poço n**. Os dois dispositivos são isolados um do outro por uma espessa região de óxido que funciona como um isolante.

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

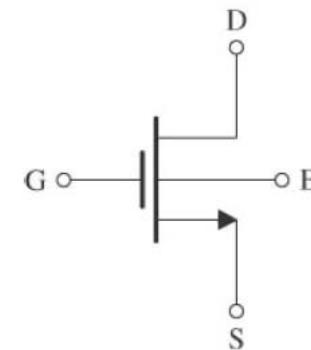
Símbolo de circuito

- A Fig. 10(a) mostra o símbolo de circuito para o MOSFET de enriquecimento de canal n.
- O espaço entre as duas linhas verticais, que representam a gate e o canal, indica que o eléctrodo da gate é isolado do corpo do dispositivo.
- A polaridade do substrato do tipo p e o canal n é indicado pela seta do traço que representa o substrato.
- Esta seta também indica a polaridade do transistor, i.e., que se trata de um dispositivo de canal n.
- Para identificar a source e o dreno (sem ter de escrever S e D), a simbologia do circuito é modificada (ver fig.9b). Para o efeito uma seta é colocada no terminal da source, distinguindo esta do terminal de dreno.

A seta aponta na direcção normal do fluxo de corrente, indicando assim a polaridade dispositivo (i.e. *canal n*)



(a)



(b)

Fig. 10

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Características tensão-corrente do MOSFET

■ Embora o símbolo da Fig (b), claramente distinga a source do dreno, na prática é a polaridade da tensão aplicada através do dispositivo que determina a source e o dreno.

■ O dreno é sempre positivo relativo à source num FET canal n.

■ Em aplicações onde a fonte está ligada ao corpo do dispositivo (situação mais comum), é possível simplificar ainda mais o símbolo do circuito (Fig. 10 (c)).

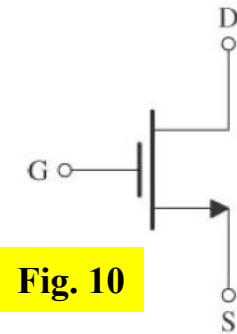
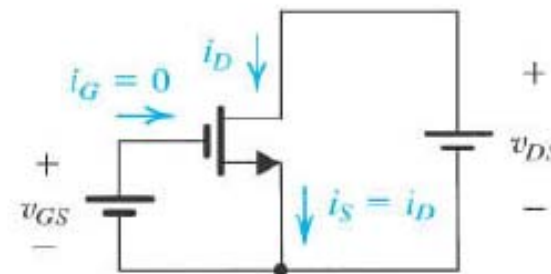


Fig. 10

(c)

Características $i_D - v_{DS}$

■ MOSFET de canal n enriquecido com tensões v_{GS} e v_{DS} aplicadas e indicando os sentidos normais das correntes (Fig.11 (a)).



(a)

Fig. 11

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Características $i_D - v_{DS}$

- Este circuito conceptual pode ser usado para medir as características $i_D - v_{DS}$, que são uma família de curvas, cada uma medida com uma tensão v_{GS} constante.
- É de esperar que cada uma das curvas $i_D - v_{DS}$, tenha a forma mostrada na Fig. 6.
- Na realidade as curvas $i_D - v_{DS}$ práticas tem o aspecto apresentado na Fig. 11 (b).
- As características da Fig. 11(b) indicam que há **três regiões distintas** de funcionamento: a **região de corte**, a **região de triodo** e a **região de saturação**.
- A região de saturação é a região usada para o funcionamento de FET como amplificador.
- Para funcionar como interruptor, utilizam-se as regiões de corte e de triodo.

Características tensão-corrente do MOSFET

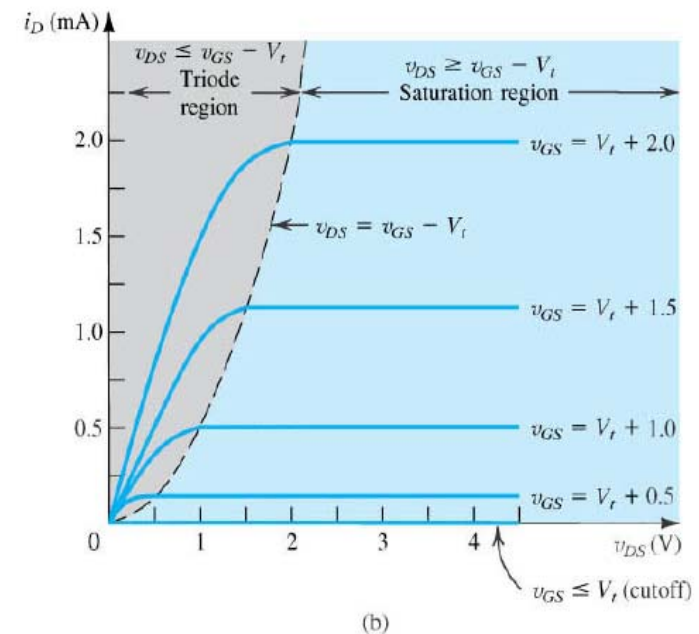


Fig. 11

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Características tensão-corrente do MOSFET

Características $i_D - v_{DS}$

■ O dispositivo está em corte quando $v_{GS} < V_t$.

■ Para operar o MOSFET na região de **tríodo**, precisamos primeiro de induzir o canal, $\Rightarrow v_{GS} \geq V_t$ (10)

e manter v_{DS} suficientemente pequeno para que o canal permaneça contínuo. Isto consegue-se assegurando que a tensão gate-dreno é:

$$v_{GD} > V_t \quad (11)$$

■ Esta condição pode ser representada explicitamente em termos de v_{DS} .

$$v_{GD} = v_{GS} + v_{SD} = v_{GS} - v_{DS} \quad \text{Assim,} \quad v_{GS} - v_{DS} > V_t \quad \text{ou} \quad v_{DS} < v_{GS} - V_t \quad (12)$$

■ As Eqs. (11) e (12) constituem as duas condições necessárias para assegurar o funcionamento da região de tríodo.

■ Isto é, o MOSFET de canal n enriquecido funciona na região de tríodo quando v_{GS} é maior do que V_t e a tensão de dreno é menor do que a tensão da gate pelo menos de V_t volt.

■ Na região de tríodo, as características $i_D - v_{DS}$ podem ser aproximadamente descritas pela relação.

$$i_D = k_n' \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_t) v_{DS} - \frac{1}{2} v_{DS}^2 \right] \quad (13)$$

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Características tensão-corrente do MOSFET

Características $i_D - v_{DS}$

■ Se v_{DS} for suficientemente pequena, por forma a podermos desprezar o termo v_{DS}^2 , obtemos para as características $i_D - v_{DS}$ junto da origem, a seguinte relação:

$$i_D \approx k_n' \frac{W}{L} [(v_{GS} - V_t) v_{DS}] \quad (14)$$

■ Esta relação linear representa o funcionamento do transistor MOS como uma resistência linear r_{DS} , cujo valor é controlado por v_{GS} . Mais especificamente, para um valor em particular $v_{GS} = V_{GS}$, r_{DS} é dado por:

$$r_{DS} = \frac{v_{DS}}{i_D} \bigg|_{v_{GS} = V_{GS}}^{v_{DS}^{small}} = \left[k_n' \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t) \right]^{-1} \quad (15)$$

Operação na região de saturação

■ Para operar o MOSFET na região de saturação, o canal tem de ser induzido, $v_{GS} \geq V_t$ (16)

e estrangulado na extremidade do dreno, elevando v_{DS} a um valor que faça com que a tensão gate-dreno se torne inferior a V_t , $v_{GD} \leq V_t$ (17)

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Características $i_D - v_{DS}$

Características tensão-corrente do MOSFET

Operação na região de saturação

- A condição pode ser expressa explicitamente em termos de v_{DS} .

$$v_{DS} \geq v_{GS} - V_t \quad (\text{Canal estrangulado}) \quad (18)$$

- Isto é, o MOSFET de canal n enriquecido funciona na região de saturação quando v_{GS} é maior do que V_t e a tensão de dreno não é inferior à tensão da gate mais do que V_t volt.

- A fronteira entre a região de triodo e a região de saturação é caracterizada por

$$v_{DS} = v_{GS} - V_t \quad (\text{Fronteira}) \quad (19)$$

- Substituindo este valor de v_{DS} em

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_t) v_{DS} - \frac{1}{2} v_{DS}^2 \right] \longrightarrow i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 \quad (20)$$

Valor de saturação da corrente i_D

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

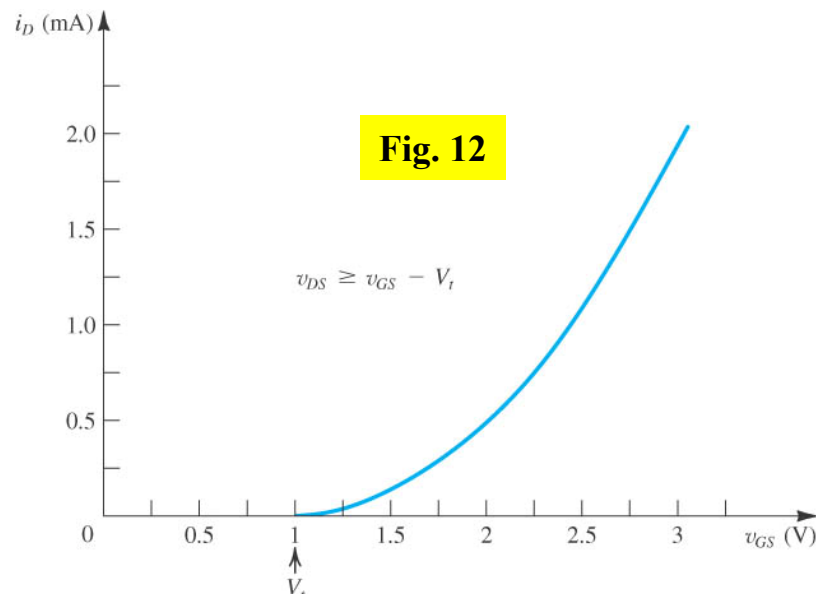
Características tensão-corrente do MOSFET

Características $i_D - v_{DS}$

Operação na região de saturação

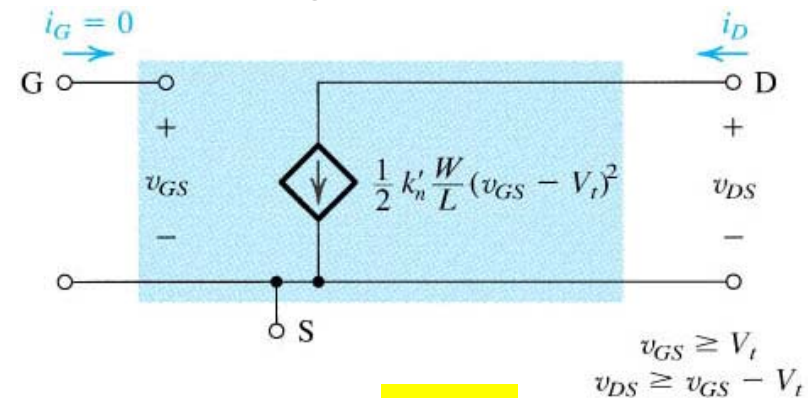
■ Assim, em saturação, o MOSFET fornece uma corrente de dreno cujo valor é independente da tensão de dreno v_{DS} e é determinado pela tensão da gate v_{GS} de acordo com a relação quadrática da Eq. (20).

■ Um esboço é mostrado na fig. 12.



■ Como a corrente de dreno é independente da tensão de dreno, o MOSFET saturado comporta-se como uma fonte de corrente ideal cujo valor é controlado por v_{GS} de acordo com a relação não linear da Eq. (20).

A fig. 13 mostra uma representação do circuito em funcionamento na região de saturação.



TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Características tensão-corrente do MOSFET

Características $i_D - v_{DS}$

- Voltando às características $i_D - v_{DS}$ da fig. 11(b), note-se que a fronteira entre as regiões de triodo e de saturação está representada como uma curva a traço interrompido.
- Uma vez que esta curva é caracterizada por $v_{DS} = v_{GS} - V_t$, a sua equação pode ser obtida substituindo $v_{GS} - V_t$ por v_{DS} , quer na equação da região de triodo (Eq. (13)), quer na equação da região de saturação (Eq. (20)).
- Assim,

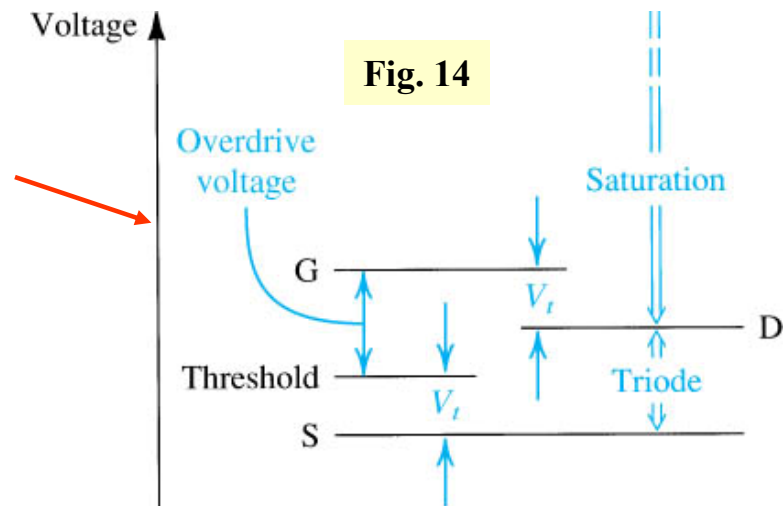
$$i_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} v_{DS}^2$$

- Deve notar-se que as características representadas nas Figs. 4, 11 e 12 são para um MOSFET com $k_n'(W/L) = 1.0 \text{ mA/V}^2$ e $V_t = 1 \text{ V}$.
- O diagrama da fig. 14 mostra os níveis relativos que as tensões terminais do transistor NMOS de enriquecimento devem ter para o funcionamento nas regiões de triodo e de saturação.

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Níveis de tensão relativos nos terminais para um NMOS para funcionamento na região de triodo e saturação

Características tensão-corrente do MOSFET



Exercício 1

Um transistor NMOS de enriquecimento com $V_t=0,7\text{ V}$ tem a source ligada à massa e uma tensão de 1,5 V aplicada à gate. Quais as regiões de funcionamento para: (a) $V_D=0,5\text{ V}$; (b) $V_D=0,9\text{ V}$; (c) $V_D=3\text{ V}$.

Exercício 2

Se o transistor NMOS do Exercício 2 tiver $\mu_n C_{ox}=100\text{ }\mu\text{A/V}^2$, $W=10\text{ }\mu\text{m}$ e $L=1\text{ }\mu\text{m}$, determine o valor da corrente de dreno para as três situações indicadas (a), (b) e (c).

Resistência de saída finita em saturação

- A equação (14) e o circuito equivalente correspondente da Fig. 13, indicam que na saturação i_D é independente de v_{DS} .
- A variação Δv_{DS} na tensão dreno-source causa uma variação nula em i_D , o que implica que a resistência incremental na direcção do dreno de um MOSFET saturado é infinita.
- Isto é no entanto uma idealização baseada na premissa de que, uma vez o canal estrangulado na extremidade do dreno, posteriores aumentos de v_{DS} não têm qualquer efeito sobre a forma do canal.
- Na prática o aumento de v_{DS} para além de $v_{DS,sat}$ afecta um pouco o canal.
- Concretamente, à medida que v_{DS} aumenta, o ponto de estrangulamento do canal move-se ligeiramente do dreno em direcção à source.
- Tal é ilustrado na Fig. 15, da qual se nota que a tensão ao longo do canal permanece constante:

$$v_{DSat} = v_{GS} - V_t$$

e a tensão adicional aplicada ao dreno, surge como uma queda de tensão através da região de depleção estreita, entre o fim do canal e a região do dreno.



TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Características tensão-corrente do MOSFET

Resistência de saída finita em saturação

■ Esta tensão acelera os electrões que atingem o fim do dreno do canal, varrendo-os para o dreno através da região de depleção.

■ Com a largura da camada de depleção, o

comprimento do canal é reduzido de L para $L - \Delta L$

■ Este fenómeno é designado por modulação do comprimento do canal.

■ Visto que i_D é inversamente proporcional ao comprimento do canal (eq. 20), com a diminuição deste, i_D aumenta com o aumento de v_{DS} .

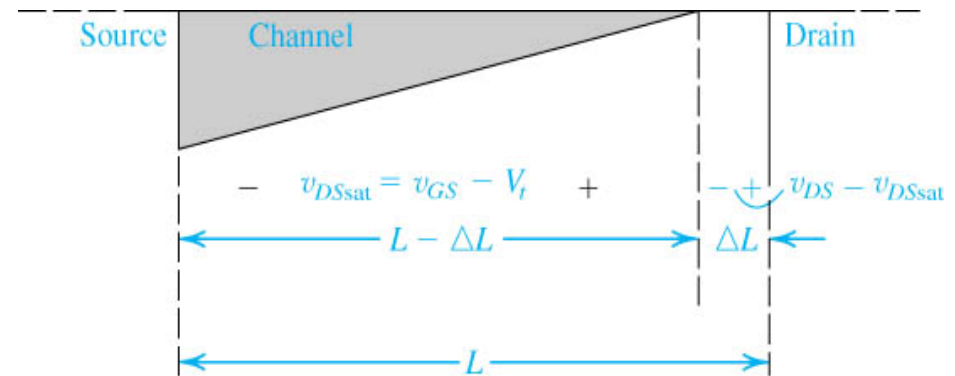


Fig. 15

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Características tensão-corrente do MOSFET

Resistência de saída finita em saturação

- Para levar em consideração a dependência de i_D em função de v_{DS} , na saturação, substitui-se L , na eq. 20, por $L - \Delta L$, obtendo-se:

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L - \Delta L} (v_{GS} - V_t)^2 = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} \frac{1}{1 - (\Delta L / L)} (v_{GS} - V_t)^2$$
$$\cong \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} \left(1 + \frac{\Delta L}{L} \right) (v_{GS} - V_t)^2 \quad (\text{assumido que } (\Delta L / L) \ll 1)$$

- Assumindo que ΔL é proporcional a v_{DS} $\Rightarrow \Delta L = \lambda' v_{DS}$

- λ' é um parâmetro relacionado com o processo tecnológico, com dimensões de $\mu\text{m}/\text{V}$.

- Substituindo na expressão de i_D :

Usualmente λ'/L é designado por λ

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} \left(1 + \frac{\lambda'}{L} v_{DS} \right) (v_{GS} - V_t)^2 = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda v_{DS}) \quad (21)$$

$$\lambda = \frac{\lambda'}{L}$$

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Características tensão-corrente do MOSFET

Resistência de saída finita em saturação

- A fig. 16 mostra um conjunto típico de características i_D - v_{DS} exibindo o efeito da modulação do comprimento do canal.
- A dependência linear observado entre i_D e v_{DS} , na região de saturação, é representada na equação (21) pelo factor $(1 + \lambda v_{DS})$.

■ Na fig. 16 notamos que prolongando para a esquerda a parte rectilínea das características i_D - v_{DS} na saturação, elas intersectam-se num mesmo ponto do eixo v_{DS} , caracterizado por $v_{DS} = -1/\lambda = -V_A$, onde V_A é uma tensão positiva.

■ Da equação 21, se $i_D = 0$, então:

$$v_{DS} = -1/\lambda$$

$$V_A = \frac{1}{\lambda}$$

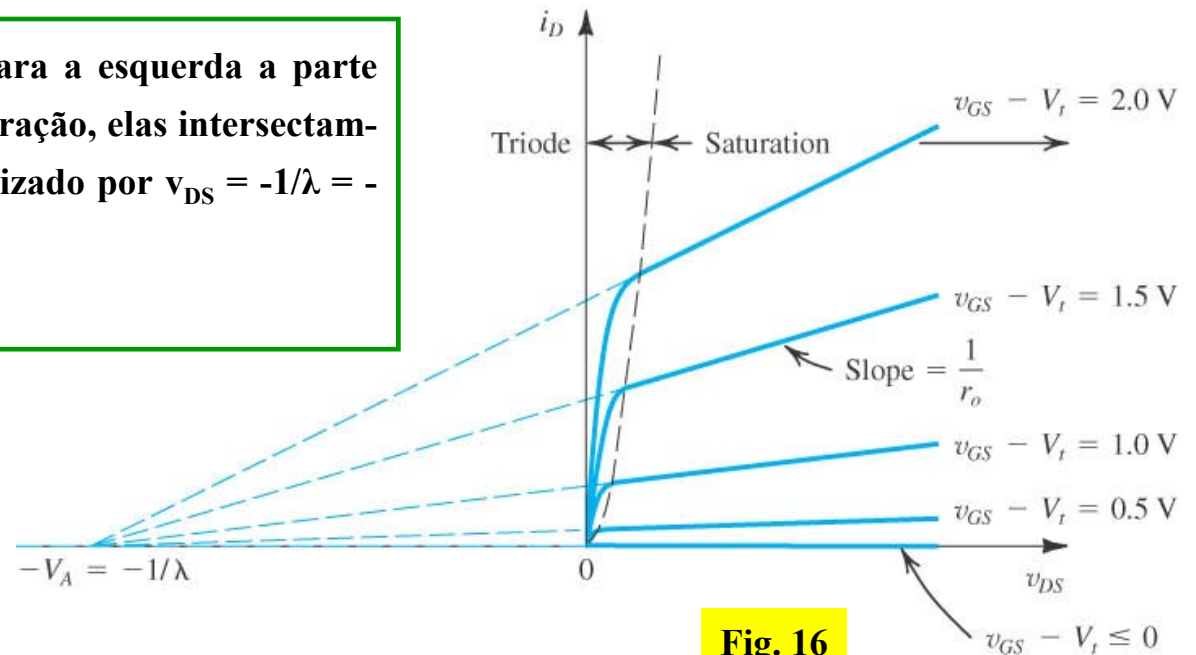


Fig. 16

TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Características tensão-corrente do MOSFET

Resistência de saída finita em saturação

- V_A é um parâmetro do processo tecnológico, com dimensões de Volt designada como tensão de Early.
- Para um dado processo, V_A é proporcional ao comprimento do canal L , que o projectista seleccione para um MOSFET.
- Pode-se representar $V_A = V_A' L$, em que V_A' é inteiramente dependente do processo tecnológico, cujas unidades são $V/\mu m$.
- Tipicamente, V_A' varia na gama de $5 V/\mu m$ a $50 V/\mu m$.

- A equação 21, indica que quando a modulação do comprimento do canal é considerada, os valores de saturação de i_D dependem de v_{DS} .
- Assim, para um dado v_{GS} , uma variação Δv_{DS} produz uma correspondente variação Δi_D , na corrente de dreno i_D .
- Uma consequência óbvia da modulação do comprimento do canal é que a resistência de saída em saturação é finita.
- Definindo a resistência de saída r_o (resistência em saturação) como,

$$r_o \equiv \left[\frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} \right]_{v_{GS}=\text{constante}}^{-1} \quad (22)$$



TRANSÍSTORES DE EFEITO DE CAMPO

Características tensão-corrente do MOSFET

Resistência de saída finita em saturação

■ Usando as equações (21) e (22) podemos obter

$$r_o = \left[\lambda \frac{k'_n W}{2 L} (v_{GS} - V_t)^2 \right]^{-1} \quad (23)$$

■ A equação (23) pode ser escrita de modo simplificado como

$$r_o = \frac{1}{\lambda I_D} \quad (24)$$

ou

$$r_o = \frac{V_A}{I_D} \quad (25)$$

■ Em que I_D é a corrente de dreno sem levar em consideração a **modulação do comprimento do canal**.

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2$$

■ Assim a resistência de saída é inversamente proporcional à corrente de dreno.

■ Modelo de circuito equivalente, incorporando r_o .

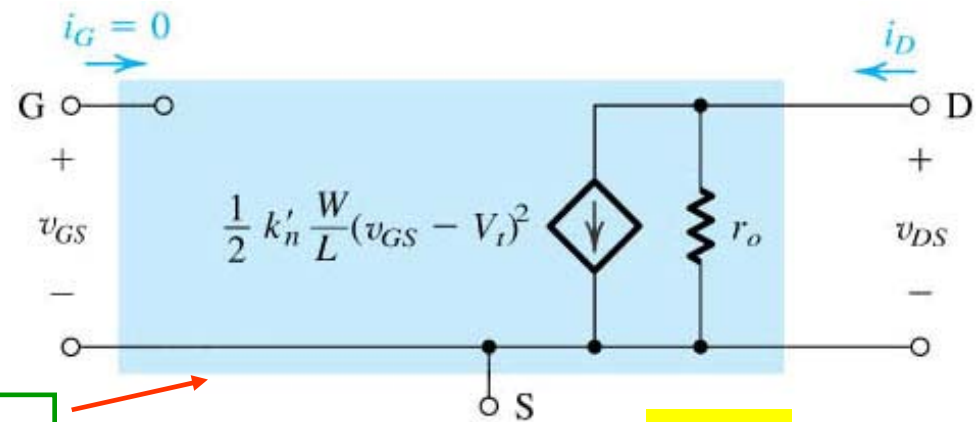


Fig. 17